

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

SUPERVISION D'UNE ÉOLIENNE  
PAR INTERNET

MÉMOIRE DE RECHERCHE  
PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Comme exigence partielle  
du programme de Maîtrise en Ingénierie  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées  
(M.Sc.A.)

PAR  
MARIO MICHAUD

SEPTEMBRE 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens spécialement à remercier tous les membres du groupe éolien pour leur support et leurs judicieux conseils et plus spécifiquement M. Adrian Ilinca Ph.D.<sup>1</sup> directeur et M. Jean-François Méthot Ph.D.<sup>2</sup> codirecteur de recherche d'avoir accepté de diriger mes travaux. Je tiens aussi à souligner le support et la compréhension de ma conjointe Valérie et mon fils Jérémie dans la réalisation de mes travaux.

---

<sup>1</sup> Professeur au département de mathématiques, d'informatique et de génie de l'Université du Québec à Rimouski

<sup>2</sup> Professeur au département de mathématiques, d'informatique et de génie de l'Université du Québec à Rimouski

## **AVANT-PROPOS**

Le domaine de l'énergie éolienne est en plein développement au Québec et ailleurs dans le monde, c'est un secteur qui connaît une croissance très rapide ces dernières années. Cette croissance est la plus forte de tous les modes de production d'énergie électrique. Ainsi, à chaque semaine, nous entendons parler dans les actualités de cette source énergie renouvelable. Selon un rapport<sup>3</sup> commandé par Greenpeace, l'énergie éolienne pourrait fournir 10% de la consommation d'électricité dans le monde en 2020. De plus, ce type de production d'énergie électrique présente un grand avantage : la réduction des émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la planète.

Toutefois, l'énergie éolienne est encore peu utilisée au Canada, comparativement à certains pays européens. Au Québec, on compte présentement au moins 133 éoliennes<sup>4</sup> installées principalement à Cap-Chat et à Matane pour une puissance totale de 100 MW. C'est un des parcs éoliens le plus important au Canada. Selon Steven Guilbeault de Greenpeace, le Canada possède les meilleurs sites éoliens en Amérique du Nord. Malgré cela, le pays traîne la patte dans ce secteur d'avenir, puisque nous n'investissons pas

---

<sup>3</sup> Rapport Wind Force 10: <http://www.greenpeace.fr/campagnes/energie/dossiers/wind10.htm>

<sup>4</sup> <http://www.axor.com/Nordais.htm>



suffisamment dans cette technologie. Deux chercheurs d'Environnement Canada, Robert Benoît et Wey Yu, ont dressé un constat des plus surprenant en déclarant que le potentiel éolien du Grand Nord<sup>5</sup> Québécois dépasse largement la production hydroélectrique actuelle de la province. Les deux chercheurs ont produit le premier atlas des vents du Canada, qu'ils ont rendu publique au congrès de l'Association canadienne de l'énergie éolienne. Une autre étude<sup>6</sup>, validée par la firme Hélimax et rendue publique en avril 2004, démontre aussi l'énorme potentiel éolien du Québec. L'étude révèle que la province jouit d'un potentiel éolien d'environ 35 000 MW, soit la production totale d'Hydro-Québec!

La production d'énergie éolienne pourrait augmenter puisque Hydro-Québec a lancé en 2003 un appel d'offres<sup>7</sup> pour implanter 1000 MW de puissance éolienne en Gaspésie. Si nous ajoutons l'appel d'offres de 2000 MW annoncé à l'automne 2005 le Québec arrivera, d'ici 10 ans, à produire plus de 3500 MW d'électricité de source éolienne.

Avec la sensibilisation de la population à la protection de l'environnement, l'essor de l'énergie éolienne et les investissements majeurs dans le secteur, le Québec fait face à un besoin important de main d'œuvre spécialisée dans ce domaine. L'Université du Québec à Rimouski est à l'avant-garde du secteur éolien et son laboratoire de recherche en énergie

---

<sup>5</sup> « Il est particulièrement intéressant de constater que les deux grandes lignes à haute tension qui proviennent de la Baie-James et des complexes Manicouagan et Churchill passent dans des zones de vents puissants et constants, où il serait facile de brancher de petits parcs d'éoliennes au réseau existant. » - Louis-Gilles Francoeur, *Devoir*, 28 février 2004

<sup>6</sup> <http://www.canwea.ca/downloads/fr/PDFS/Helimax-Report-FR.pdf>

<sup>7</sup> [http://www.hydroquebec.com/4d\\_includes/surveiller/PcFr2005-032.htm](http://www.hydroquebec.com/4d_includes/surveiller/PcFr2005-032.htm)

éolienne représente le plus important regroupement de chercheurs multidisciplinaires dans le domaine éolien au Canada.

Comme on le voit, le domaine de l'énergie éolienne au Québec est en voie de s'épanouir et c'est pourquoi il a retenu notre attention dans la poursuite de cette étude. De plus, le projet proposé par le directeur de recherche, M. Adrian Ilinca Ph.D., cadrerait bien avec notre champ de compétences et il nous a permis d'appliquer une expertise du domaine du génie électrique et de l'informatique à l'exploitation de l'énergie éolienne.

Le but de cette recherche est de développer un système de supervision d'une éolienne de moyenne puissance par le réseau Internet. La complexité croissante des parcs éoliens et de leurs turbines justifie le développement d'outils complets pour l'analyse de leurs performances. Par exemple, la connaissance des variables météorologiques de vitesse et de direction du vent et de la puissance électrique permet, entre autres, de valider la courbe de puissance de l'éolienne. Une éolienne de 35 kW a été utilisée pour effectuer l'expérimentation du système développé. Dans un premier temps, les données météorologiques, les données électriques et une caméra ont permis l'observation en direct de l'éolienne à l'aide d'un navigateur Internet. Ensuite, l'ajout d'un module permettant l'acquisition des données fournit au Groupe Éolien de l'UQAR un outil puissant afin de poursuivre des travaux de recherche sur l'énergie éolienne.

## **RÉSUMÉ**

Le domaine de l'énergie éolienne est en plein développement au Québec et ailleurs dans le monde, c'est un secteur qui connaît une croissance très rapide ces dernières années. Avec la sensibilisation de la population à la protection de l'environnement, l'essor de l'énergie éolienne et les investissements majeurs dans le secteur, le Québec fait face à un besoin important de main d'œuvre spécialisée dans ce domaine. L'Université du Québec à Rimouski est à l'avant-garde du secteur éolien et son laboratoire de recherche en énergie éolienne représente le plus important regroupement de chercheurs multidisciplinaires dans le domaine éolien au Canada.

Un nombre grandissant d'appareils se connectent sur le réseau Internet et, parmi ceux-là nous trouvons les téléphones cellulaires, les systèmes d'alarme, les machines distributrices, les systèmes automatisés de production, les compteurs d'électricité, etc. Les technologies actuelles permettent de connecter ces appareils à Internet via une ligne téléphonique, la téléphonie cellulaire ou un réseau Ethernet, que ce soit avec un fournisseur d'accès à Internet ou par connexion directe. Cette technologie, comprend aussi la pile classique des protocoles TCP/IP. Ces protocoles permettent, entre autres, l'envoi (SMTP) et

la réception (POP3) de courriels, le transfert de fichiers (FTP), l'accès à des pages Web (HTTP).

La connexion d'une éolienne à Internet offre la possibilité d'avoir accès en temps réel ou différé aux données et au contrôle de celle-ci et de n'importe où. L'accessibilité et la connectivité apportent plusieurs avantages tels que la supervision à distance de l'état de l'éolienne, la modification à distance des paramètres, la visualisation de l'historique des données de production, de la supervision en temps réel, l'échange de données par courriel, l'analyse statistique des données et le support aux travaux de recherche en modélisation.

Bien que les éoliennes soient contrôlées par des automates programmables ou par micro-ordinateur, leur éloignement géographique et les conditions environnementales les rendent souvent difficiles à superviser et à surveiller. Une solution consiste à surveiller à distance l'éolienne via le réseau Internet afin d'effectuer les tâches de supervision, de contrôle et d'acquisition de données. Lors d'un bris d'équipement le personnel d'entretien peut être averti directement par la console de supervision, par téléavertisseur ou par courriel. L'acquisition des données météorologiques et de production permet de mieux planifier les entretiens, de valider la courbe de puissance, d'optimiser le rendement et de fournir des données pour des travaux de recherche.

Dans ce type d'application, l'analyse des besoins doit tenir compte des aspects spécifiques: localisation et accès au site, accès au réseau Internet, types de données à

acquérir et le traitement statistique, supervision en temps réel ou en différé, contrôle sécuritaire à distance, mise à jour des paramètres du contrôleur de l'éolienne. Ainsi, plusieurs solutions peuvent être envisagées selon le site de l'éolienne et les besoins particuliers.

Pour une application simple, les équipements nécessaires à la mise en oeuvre d'un tel système sont : un micro-ordinateur avec modem téléphonique, un module de communication et un accès à Internet par ligne téléphonique. Pour une application plus élaborée, nous aurons besoin, par exemple, d'un serveur HTTP /JSP, d'un serveur de données SQL, d'un module Ethernet et un accès Internet haute vitesse. Le serveur HTTP /JSP gère la base de données et l'interactivité avec les utilisateurs par Internet. L'utilisation du langage de programmation Java facilite le développement d'applications réseau, côté client, avec ses applets et, côté serveur, avec ses servlets.

Le but de cette recherche est de développer un système de supervision d'une éolienne de moyenne puissance par le réseau Internet. La complexité croissante des parcs éoliens et de leurs turbines justifie le développement d'outils complets pour l'analyse de leurs performances. Par exemple, la connaissance des variables météorologiques de vitesse et de direction du vent et de la puissance électrique permet, entre autres, de valider la courbe de puissance de l'éolienne. Dans un premier temps, les données météorologiques, les données électriques et une caméra ont permis l'observation en direct de l'éolienne à l'aide d'un navigateur Internet. Ensuite, l'ajout d'un module permettant l'acquisition des données

fournit au Groupe Éolien de l'UQAR un outil puissant afin de poursuivre des travaux de recherche sur l'énergie éolienne.

La plupart des travaux de recherche récents dans le domaine de la supervision et de l'acquisition de données par Internet utilisent une architecture client / serveur. Un micro-ordinateur, situé sur le site, s'occupe de récupérer les données provenant d'une carte d'acquisition. Ce micro-ordinateur fournit les données à un serveur HTTP connecté au réseau Ethernet. Le serveur HTTP se charge ensuite de rendre les données disponibles aux clients. Depuis peu, la technologie du web embarqué est disponible. Ainsi, nous pouvons remplacer le micro-ordinateur installé sur le site, par un système avec microcontrôleur offrant la technologie web embarquée.

Le système développé permet de superviser, à l'aide d'un lien Internet haute vitesse, une éolienne de moyenne puissance. L'utilisateur a accès aux informations sur l'énergie produite au cours des derniers 24 heures, la puissance électrique produite, la vitesse et la direction du vent et de la température. Une caméra web permet aussi de visualiser en tout temps l'éolienne. On peut aussi accéder aux statistiques de l'éolienne, car la plupart des paramètres mesurés sont emmagasinées dans une base de données. Les statistiques disponibles sont la moyenne, l'écart type, la valeur maximale et la valeur minimale sur une période de 10 minutes et ce, pour tous les paramètres mesurés. Les fenêtres de visualisation s'exécutent dans le micro-ordinateur de l'utilisateur grâce à des "applets" développés en

langage Java. Du côté du serveur, des "servlet" permettent d'interroger la base de données en utilisant des requêtes SQL et ainsi fournir les informations demandées par l'utilisateur.

Le système a été expérimenté sur une éolienne de petite puissance (35 kW) en opération, 2 solutions ont été expérimentées. D'abord une solution permettant de visualiser en direct sur Internet une image de l'éolienne en production, de la tension produite, du courant fourni, de la température, de la vitesse du vent et de la direction du vent sur le site. Avec cette solution, les clients se raccordent directement à la carte de communication de l'éolienne, ce qui peut causer un problème important. Le serveur HTTP de la carte de communication ne peut que deux communications simultanées. Ceci limite le nombre de clients. Néanmoins, une communication par le protocole HTTP n'est pas constamment active car un client fait une requête au serveur, il envoie sa réponse et ferme la communication. Ainsi, nous avons programmé dans l'applet une demande de données à toutes les cinq secondes ce qui permet au serveur de répondre à plusieurs clients dans cet intervalle. L'avantage de cette solution est le développement facile de l'application. Les désavantages sont qu'on ne peut pas fournir en temps réel les données aux clients, il n'y a aucune sauvegarde de l'historique des données, il n'y a aucun calcul statistique de la moyenne et de l'écart type et, enfin, plusieurs clients peuvent avoir accès directement au serveur HTTP de la carte de communication ce qui pourrait occasionner des problèmes.

Dans la deuxième solution expérimentée, nous avons ajouté un serveur qui permet de récolter les données de l'éolienne, d'archiver les données dans une base de données ou dans

un fichier texte et d'interroger la base de données afin de répondre aux requêtes des clients. Cette solution comporte le développement d'un programme beaucoup plus élaboré puisqu'on doit gérer les échanges avec une base de données en utilisant un applet et un servlet.

Sur le site de l'éolienne, un réseau Ethernet à haute vitesse a été installé afin de permettre le raccordement à l'Internet du système de supervision et de la caméra. Un système d'acquisition collecte les données météorologiques telles que la vitesse et la direction du vent, la température, ainsi que les paramètres électriques – la tension, le courant et la fréquence de la tension produite par la génératrice. Le module d'acquisition de données communique par un port série avec un module de communication qui supporte un serveur HTTP. Les paramètres mesurés sont transmis à intervalle régulier via le port série au module de communication. Le serveur HTTP récupère ces données. Ces données peuvent ensuite être récupérées sur le réseau Internet. Un micro-ordinateur raccordé au réseau Internet est chargé de récupérer les données du serveur HTTP du site de l'éolienne et de les emmagasiner dans une base de données. Un logiciel de serveur JSP/servlet est installé dans ce micro-ordinateur afin de répondre aux requêtes des utilisateurs. Lorsqu'un utilisateur communique avec le serveur JSP, il télécharge un applet qui va supporter l'interface utilisateur. Cette interface permet aux utilisateurs de visualiser les données actuelles reçues du site de l'éolienne. L'interface permet aussi de placer des requêtes à la base de données pour visualiser des données historiques, des statistiques et des courbes de tendances.



Après l'analyse des avantages et des inconvénients des solutions, la deuxième solution semble répondre plus exactement à la problématique de notre application. Cette solution permet de gérer plusieurs connections avec des clients car le serveur externe HTTP /servlet est un micro-ordinateur et non un serveur web embarqué. De plus, ce serveur peut-être installé à n'importe quel endroit avec une connexion Internet haute vitesse. Seul ce serveur communique avec la station d'acquisition des données de l'éolienne.

La réalisation d'un système de supervision d'une éolienne par Internet nécessite des connaissances multidisciplinaires (électricité, électronique analogique et numérique et informatique). Nous avons aussi besoin de différents équipements et logiciels:

1. instrumentation pour mesurer les différents paramètres de fonctionnement et les données météorologiques,
2. des circuits électroniques pour conditionner les signaux reçus de l'instrumentation et les rendre utilisables par une carte d'acquisition de données (circuits de conversion analogique à numérique),
3. un micro-ordinateur pour récupérer et emmagasiner les données et les transmettre à un serveur web,
4. un serveur web qui va fournir par Internet les données aux clients sous forme de pages graphiques, de graphiques de tendances historiques et de statistiques.

Le choix du matériel pour la communication est directement lié au système de contrôle de l'éolienne. Généralement, on utilise un automate programmable pour contrôler une éolienne et elles possèdent pour la plupart un module de communication TCP/IP ce qui facilite l'intégration. La particularité du système développé est qu'il est conçu autour d'un microcontrôleur ayant les capacités d'échanger de l'information par port série ou par Ethernet. Donc, il peut s'adapter à n'importe lequel système de contrôle déjà en place afin de rendre les informations disponibles sur Internet.

Les résultats obtenus sont très acceptables pour la supervision et l'acquisition de données à distance par Internet. L'acquisition des données peut s'effectuer pour toutes les variables à un intervalle aussi petit qu'une seconde ce qui permet de bien modéliser les phénomènes climatiques et le fonctionnement de la turbine éolienne.

# **TABLE DES MATIÈRES**

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>II</b>
<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>VI</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTE DES ÉQUATIONS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES .....</b>	<b>XXV</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
PROBLÉMATIQUE .....	2
OBJECTIFS .....	3
MÉTHODOLOGIE.....	4
ÉTAT DE LA RECHERCHE .....	4
ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE .....	8
<b>CHAPITRE 1 SUPERVISION PAR INTERNET .....</b>	<b>9</b>
1.1 INTRODUCTION .....	9
1.2 INTERNET .....	9
1.3 MODÈLE CLIENT / SERVEUR .....	11

1.4	ÉTAT DE LA RECHERCHE.....	14
1.5	ANALYSE DES SOLUTIONS .....	18
1.5.1	SOLUTION #1 .....	20
1.5.2	SOLUTION #2 .....	21
1.5.3	SOLUTION #3 .....	23
1.6	SYNTHÈSE .....	24
<b>CHAPITRE 2 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SYSTÈME .....</b>		<b>26</b>
2.1	INTRODUCTION .....	26
2.2	ARCHITECTURE DE L'APPLICATION .....	27
2.3	RÉSEAU INTERNE (INTRANET) .....	29
2.4	CONFIGURATION DU ROUTEUR ET DES ADRESSES IP .....	31
2.5	SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DE COMMUNICATION .....	32
2.6	CAMÉRA IP .....	33
<b>CHAPITRE 3 MESURES ET INSTRUMENTATION .....</b>		<b>35</b>
3.1	MESURE DE LA VITESSE DU VENT .....	35
3.1.1	ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES .....	36
3.1.2	INSTRUMENTATION .....	37
3.1.3	CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	41
3.1.4	SIMULATION DU CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	45
3.2	MESURE DE LA DIRECTION DU VENT .....	47
3.2.1	ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES .....	47
3.2.2	INSTRUMENTATION .....	48
3.2.3	CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	50
3.2.4	SIMULATION DU CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	54
3.3	MESURE DE LA TEMPÉRATURE.....	54

3.3.1	ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES .....	55
3.3.2	INSTRUMENTATION.....	55
3.3.3	CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	57
3.3.4	SIMULATION DU CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	59
3.4	MESURE DES SIGNAUX ÉLECTRIQUES DE LA TURBINE .....	60
3.4.1	ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES .....	63
3.4.2	INSTRUMENTATION.....	64
3.4.3	CONDITIONNEUR DE SIGNAL DE TENSION / FRÉQUENCE .....	65
3.4.4	SIMULATION DU CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	70
3.4.5	CONDITIONNEUR DE SIGNAL DE COURANT .....	72
3.4.6	SIMULATION DU CONDITIONNEUR DE SIGNAL .....	73
3.5	CAMÉRA IP.....	75
3.5.1	PROTOCOLE DE TRANSFERT D'IMAGE .....	75
3.5.2	MESSAGE ÉTAT DU SERVEUR .....	76
3.5.3	AUTHENTIFICATION DU CLIENT .....	77
3.5.4	RÉSULTAT DE L'AUTHENTIFICATION .....	78
3.5.5	TRANSFERT D'IMAGE .....	78
3.5.6	ALGORITHME DE RÉCEPTION D'UNE IMAGE.....	80
<b>CHAPITRE 4 SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DE COMMUNICATION.....</b>		<b>81</b>
4.1	INTRODUCTION .....	81
4.2	MICROCONTRÔLEUR.....	82
4.3	INTERNET EMBARQUÉ.....	83
4.4	TECHNOLOGIE SMARTSTACK .....	85
4.5	CONVERSION DES MESURES ANALOGIQUES .....	87
4.5.1	ALGORITHMES DES PROGRAMMES POUR LA CONVERSION DES MESURES ANALOGIQUES .....	90
4.6	CONVERSION DE LA MESURE DE LA VITESSE DU VENT .....	94

4.6.1	ALGORITHME DU PROGRAMME DE MESURE DE LA VITESSE DU VENT .....	99
4.7	CONVERSION DE LA MESURE DE LA FRÉQUENCE.....	100
4.7.1	ALGORITHME DU PROGRAMME DE MESURE DE LA FRÉQUENCE DE LA TENSION .....	104
<b>CHAPITRE 5 SYSTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES.....</b>		<b>105</b>
5.1	INTRODUCTION .....	105
5.2	PRINCIPE.....	106
5.3	INTERFACE UTILISATEUR .....	107
5.4	ALGORITHME DU SYSTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES .....	109
5.5	BASE DE DONNÉES.....	110
5.6	CLASSES DU PROGRAMME DE COLLECTE DE DONNÉES.....	111
5.7	FORMAT DU FICHIER CSV .....	112
<b>CHAPITRE 6 ARCHITECTURE LOGICIELLE .....</b>		<b>114</b>
6.1	INTRODUCTION .....	114
6.2	SERVLET.....	115
6.3	INTERFACE UTILISATEUR .....	118
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>119</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>125</b>
<b>ANNEXE I CONTENU DU CD .....</b>		<b>126</b>
<b>ANNEXE II SPÉCIFICATION DE LA CAMÉRA IP .....</b>		<b>128</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 Mesures des performances d'une éolienne de 10 kW de l'Université de Canterbury .....	6
Tableau 2 Synthèse des solutions .....	25
Tableau 3 Configuration des adresses IP et des ports du réseau .....	32
Tableau 4 Correspondances entre la fréquence indiquée par l'anémomètre NRG #40 et la vitesse du vent.....	41
Tableau 5 Correspondance tensions d'entrée et de sortie de l'interface pour la mesure de la direction du vent .....	54
Tableau 6 Signaux mesurés par le système d'acquisition de données. ....	83
Tableau 7 Variables du serveur HTTP embarqué.....	86
Tableau 8 Serveur HTTP embarqué: data.html .....	86
Tableau 9 Signaux de la carte d'interface .....	87
Tableau 10 Format du fichier data.html sur le serveur HTTP embarqué .....	107
Tableau 11 Format du fichier csv .....	112
Tableau 12 Exemple fichier csv.....	113

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 Diagramme WebRAPS Murdoch University .....	7
Figure 2 Architecture 2-tiers.....	12
Figure 3 Architecture 3-tiers.....	13
Figure 4 Architecture d'un système de supervision par Internet.....	15
Figure 5 Comparaison Web embarqué .....	19
Figure 6 Architecture de la solution #1 .....	20
Figure 7 Architecture de la solution #2 .....	22
Figure 8 Architecture de la solution #3 .....	23
Figure 9 Photographie des installations .....	27
Figure 10 Photographie du panneau de supervision .....	28
Figure 11 Architecture de l'application.....	29
Figure 12 Configuration du réseau sans fil.....	30
Figure 13 Équipements de réseau sans fil bâtiment #1 .....	30
Figure 14 Équipements du réseau sans fil bâtiment #2 .....	31
Figure 15 Équipements du réseau sans fil dans la cabane .....	31
Figure 16 Système d'acquisition de données et de communication.....	33
Figure 17 Caméra réseau Internet Intellinet Series 550710.....	34



Figure 18 Anémomètre de type NRG #40 .....	38
Figure 19 Caractéristique de l'anémomètre NRG #40 .....	40
Figure 20 Schéma bloc du conditionneur de signal pour la mesure de la vitesse du vent....	42
Figure 21 Schéma électrique du conditionneur de signal pour la mesure de la vitesse du vent.....	43
Figure 22 Réponse du circuit de vitesse du vent à un signal 1 m/s .....	46
Figure 23 Réponse Circuit Vitesse du vent signal 96 m/s .....	46
Figure 24 Girouette de type NRG 200P.....	48
Figure 25 Potentiomètre NRG 200P .....	50
Figure 26 Interface pour la mesure de la direction du vent avec une girouette NRG 200P .	51
Figure 27 Conditionneur de signal pour la mesure de la direction du vent .....	52
Figure 28 Sonde de température Campbell Scientific CS-500 .....	56
Figure 29 Valeurs d'entrée et de sortie pour la sonde de température CS-500.....	56
Figure 30 Schéma bloc du conditionneur de signal pour la mesure de la température .....	57
Figure 31 Circuit conditionneur de signal pour la sonde de température.....	58
Figure 32 Simulation du fonctionnement du conditionneur du signal de température.....	60
Figure 33 Courbe de puissance de l'éolienne PGI de 35 kW .....	62
Figure 34 Transformateur de courant. ....	65
Figure 35 Schéma bloc pour la mesure de la tension et de la fréquence .....	66
Figure 36 Conditionneur de signal pour la mesure de la tension et de la fréquence .....	67
Figure 37 Simulation du conditionneur du signal de tension. ....	71
Figure 38 Simulation du conditionneur du signal de tension. ....	71

Figure 39 Schéma bloc pour la mesure du courant.....	72
Figure 40 Conditionneur pour la mesure du signal de courant.....	73
Figure 41 Simulation du conditionneur du signal de courant. ....	74
Figure 42 Simulation du conditionneur du signal de courant. ....	74
Figure 43 Transfert de paquets entre la caméra et un client. ....	76
Figure 44 Algorithme de réception d'une image de la caméra. ....	80
Figure 45 Schéma bloc du système d'acquisition de données et de communication.....	81
Figure 46 Carte microcontrôleur H8S2633. ....	82
Figure 47 Convertisseur A / N.....	88
Figure 48 Convertisseur A / N Registre ADDR .....	88
Figure 49 Algorithme du programme de mesure de la tension.....	90
Figure 50 Algorithme du programme de mesure du courant.....	91
Figure 51 Algorithme du programme de mesure de la température. ....	92
Figure 52 Algorithme du programme de mesure de la direction du vent. ....	93
Figure 53 Temporisateur de mesure de la vitesse du vent.....	95
Figure 54 Exemple de calcul de la vitesse du vent. ....	96
Figure 55 Débordement lors de la mesure de la vitesse du vent.....	98
Figure 56 Algorithme du programme de mesure de la vitesse du vent .....	99
Figure 57 Temporisateur de mesure de la fréquence. ....	100
Figure 58 Algorithme du programme de mesure de la fréquence .....	104
Figure 59 Architecture du système de collecte des données .....	105
Figure 60 Interface utilisateur pour la collecte des données.....	108

Figure 61 Algorithme du processus de collecte des données .....	109
Figure 62 Architecture 3-tiers.....	115
Figure 63 Architecture serveur HTTP et Servlet .....	116
Figure 64 Interface utilisateur.....	118

## **LISTE DES ÉQUATIONS**

Équation 1 Conversion de la vitesse du vent en m/s.....	40
Équation 2 Conversion de la vitesse du vent de m/s à km/h.....	40
Équation 3 Point de déclenchement supérieur. ....	43
Équation 4 Point de déclenchement inférieur. ....	44
Équation 5 Fréquence de coupure.....	44
Équation 6 Amplificateur différentielle avec gain de 2. ....	45
Équation 7 Tension minimale du circuit de la girouette. ....	53
Équation 8 Tension maximale du circuit de la girouette. ....	53
Équation 9 Fréquence de coupure du circuit de la girouette.....	53
Équation 10 Amplificateur inverseur de circuit de la girouette.....	53
Équation 11 Amplificateur sommateur de circuit de la girouette.....	54
Équation 12 Amplificateur différentielle du circuit de température.....	59
Équation 13 Calcul de l'énergie totale en kwh.....	64
Équation 14 Conversion d'une tension efficace en une tension maximale. ....	66
Équation 15 Calcul de la valeur moyenne d'une onde sinusoïdale. ....	66
Équation 16 Conversion d'une tension efficace en une valeur moyenne.....	66
Équation 17 Calcul du gain en tension du premier étage du circuit de tension/fréquence. ..	68

Équation 18 Amplificateur inverseur gain unitaire du circuit de tension/fréquence. ....	68
Équation 19 Amplificateur sommateur inverseur (alternance positive) du circuit de tension/fréquence. ....	69
Équation 20 Amplificateur sommateur inverseur (alternance négative) du circuit de tension/fréquence. ....	69
Équation 21 Conversion valeur numérique en une tension RMS. ....	89
Équation 22 Conversion valeur numérique en une courant RMS ....	89
Équation 23 Conversion valeur numérique en une température en Celsius. ....	89
Équation 24 Conversion valeur numérique en un angle de 0 à 360 degré. ....	89
Équation 25 Fréquence de l'horloge interne. ....	94
Équation 26 Période de l'horloge interne. ....	94
Équation 27 Variation minimale des registres de calcul de la vitesse du vent. ....	96
Équation 28 Variation maximale des registres de calcul de la vitesse du vent. ....	96
Équation 29 Période du calcul de la vitesse du vent. ....	97
Équation 30 Fréquence du calcul de la vitesse du vent. ....	97
Équation 31 Calcul de la vitesse du vent sans débordement du registre. ....	97
Équation 32 Calcul de la vitesse du vent avec débordement du registre. ....	98
Équation 33 Variation minimale des registres de calcul de la fréquence. ....	101
Équation 34 Fréquence du signal de tension sans débordement du registre. ....	102
Équation 35 Fréquence du signal de tension avec débordement du registre ....	102

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES**

API	Application Programming Interface
ARP	Address Resolution Protocol
ASP	Active Server Page
CGI	Common Gateway Interface
DNS	Domain Name Service
DHCP	Dynamic Host Control Protocol
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FTP	File Transfer Protocol
GSM	Global System for Mobile Communication
HTTP	HyperText Transfer Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IP	Internet Protocol
IPCP	Internet Protocol Control Protocol
IRC	Internet Relay Chat
ISP	Internet Service Provider
LCP	Link Control Protocol
MAC	Media Access Control

MTU	Maximum Transfer Unit
NCP	Network Control Protocol
NTP	Network Time Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PAP	Password Authentication Protocol
POP3	Post Office Protocol
PPP	Point to Point Protocol
PSTN	Public Switched Telephone Network
RARP	Reverse Address Resolution Protocol
RFC	Request For Comments
SMTP	Simple Network Management Protocol
SQL	Structured Query Language
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

## **INTRODUCTION**

L'objectif principal de cette recherche consiste à développer une application permettant de faire la supervision, le contrôle et l'acquisition de données sur une éolienne via le réseau Internet.

Un nombre grandissant d'appareils se connectent au réseau Internet et, parmi ceux là, on retrouve les téléphones cellulaires, les systèmes d'alarme, les machines distributrices, les systèmes automatisés de production, les compteurs d'électricité, etc.

La connexion d'une éolienne à Internet offre la possibilité d'avoir accès en temps réel ou différé, aux données et au contrôle de celle-ci de n'importe où. Cette accessibilité et cette connectivité apportent plusieurs avantages : la supervision à distance de l'état de l'éolienne, la gestion à distance des paramètres, la visualisation des données de production, la supervision en temps réel, l'échange de données par courriel et l'analyse statistique des données et le support aux travaux de recherche en modélisation.

Les technologies actuelles permettent de connecter à peu près n'importe quel appareil à Internet en utilisant une ligne téléphonique, la téléphonie cellulaire, un réseau Ethernet, les fréquences radio ou un satellite.



## **Problématique**

Bien que les éoliennes soient contrôlées par des automates programmables ou par micro-ordinateur, leur éloignement géographique et les conditions environnementales les rendent souvent difficiles à superviser et à surveiller. Une solution consiste à surveiller à distance l'éolienne via le réseau Internet afin d'effectuer les tâches de supervision, de contrôle et d'acquisition de données. Lors d'un bris d'équipement le personnel d'entretien peut être averti directement par la console de supervision, par téléavertisseur ou par courriel. L'acquisition des données météorologiques et de production permet de mieux planifier les entretiens, de valider la courbe de puissance, d'optimiser le rendement et de fournir des données pour des travaux de recherche.

L'analyse des besoins d'un projet de supervision à distance doit tenir compte de critères qui dépendent de la situation géographique de l'éolienne tels que l'accessibilité du site et la disponibilité des moyens de communication par Internet. Il faut aussi tenir compte de critères tels que l'acquisition de données avec traitement statistique, la supervision en temps réel ou en différé, etc. Ainsi, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Pour une application simple de supervision, les équipements nécessaires à la mise en oeuvre du système sont un micro-ordinateur avec accès à Internet. Pour une application plus élaborée de supervision et d'acquisition de données en temps réel, nous pourrions utiliser un serveur HTTP /JSP, une base de données SQL et un accès à Internet haute vitesse. Le serveur HTTP /JSP gèrerait la base de données et l'interactivité avec les utilisateurs.

## **Objectifs**

Le système développé doit présenter les caractéristiques techniques suivantes :

1. Fournir des informations en permanence, 24h/24, via un site Internet, des paramètres vitaux du fonctionnement de l'éolienne et permettre un accès sans restrictions au public.
2. Afficher les paramètres instantanés de puissance et fréquence délivrés par l'éolienne, vitesse du vent, direction du vent, température extérieure, production cumulée (en kWh) des 24 dernières heures et état de l'éolienne (en production, en démarrage ou à l'arrêt).
3. Présenter des informations se fera à l'aide d'une page web conçue pour une compréhension facile par des non-initiés avec un affichage bilingue.
4. Fournir une image en provenance d'une caméra ("Web Cam") permettant de visualiser en temps réel le fonctionnement de l'éolienne (avec un taux de rafraîchissement de l'image adapté à la vitesse de connexion Internet).
5. La page web devrait fournir un lien Internet vers les conditions météo actuelles de la station d'environnement Canada la plus proche;
6. Présenter les caractéristiques techniques de la centrale éolienne, soit la puissance nominale, la vitesse moyenne des vents sur le site, la direction dominante du vent, la latitude et longitude de l'emplacement de l'éolienne;
7. La page web offrira, par lien protégé par mot de passe, un accès aux statistiques d'acquisition des données.

## **Méthodologie**

Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été effectuée sur des projets de recherche similaires. Par la suite, la lecture de près de 30 articles, sur la supervision et l'acquisition de données à distance par Internet, a permis de constater l'état de la recherche dans ce domaine et d'élaborer les démarches à suivre pour la réalisation du projet. Des articles consultés, 9 ont été retenues, car plusieurs références étaient répétitives.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de la recherche et les hypothèses retenues. Dans le second, nous présentons une vue d'ensemble du projet en lien avec les solutions envisagées. Dans le troisième chapitre, nous discutons du matériel choisi pour effectuer les différentes mesures des paramètres à superviser. Dans le quatrième chapitre, nous présentons le système d'acquisition et de communication des données par Internet élaboré avec un microcontrôleur. Dans le cinquième chapitre, nous présentons le système de collecte des données dans la base de données. Dans le sixième chapitre, nous présentons les applets de supervision et de requête des statistiques et le "servlet" de traitement des requêtes dans la base de données. Finalement, nous terminons sur l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

## **État de la recherche**

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur la supervision à distance, par Internet, d'équipements en énergies renouvelables. Le

département de génie mécanique de l'Université de Canterbury en Nouvelle-Zélande [1] a utilisé un système d'acquisition de données raccordé à un modem téléphonique pour étudier les performances d'une éolienne de 10 kW à partir de leur laboratoire. Les données sont enregistrées sur le disque dur du micro-ordinateur installé sur le parc éolien. Par la suite, à une fréquence régulière, les données sont téléchargées directement sur un micro-ordinateur de l'université par modem téléphonique. Depuis 1993, ce système permet d'alimenter en énergie électrique une maison. Le système possède une génératrice diesel comme source d'énergie d'appoint et un contrôleur permet la recharge d'un ensemble de batteries. L'énergie excédentaire produite par l'éolienne est envoyée à une charge de puissance qui permet de chauffer une réserve d'eau. Le système d'acquisition de données, conçu à partir du système « GPSE weather station » distribué par la compagnie A.R Harris Ltd, a été grandement modifié pour répondre aux besoins spécifiques du projet. Il possède 13 canaux analogiques et 2 canaux discrets (tableau 1) afin mesurer les données météorologiques sur le site et les caractéristiques électriques du système.

La mesure de la direction et de la vitesse du vent sont effectuées par un anémomètre 7911 de la compagnie Davis installé à l'extrémité d'un mat de 10,5 mètres localisé près de l'éolienne. La vitesse de l'arbre de l'éolienne est mesurée en utilisant la fréquence du signal CA provenant d'une génératrice à 19 paires de pôle. Les signaux électroniques des mesures sont envoyés à une carte d'interface, développée par l'université, avant d'être acheminés vers le système d'acquisition de données. L'échantillonnage des données s'effectue comme suit : on enregistre la moyenne des données sur 10 minutes, une moyenne est calculée sur

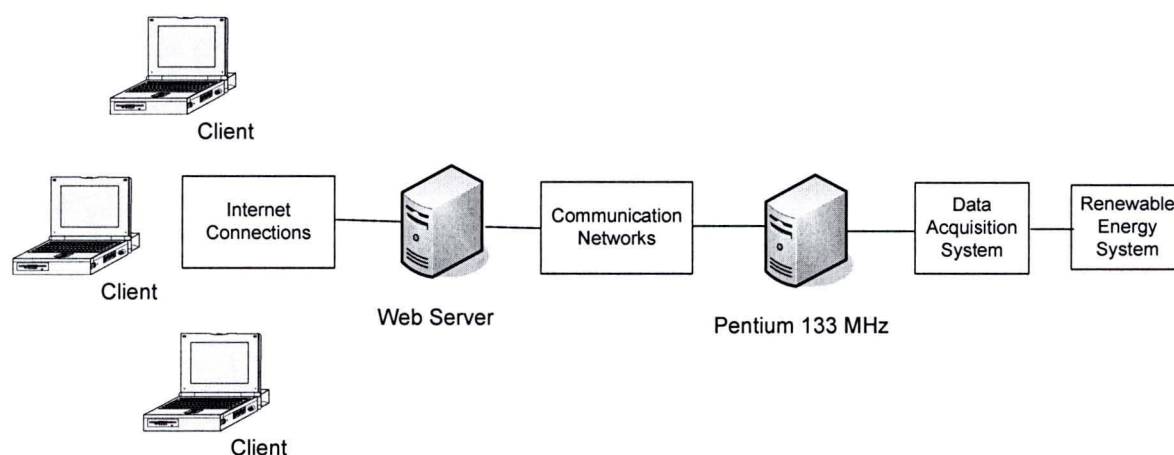
120 lectures. L'intervalle d'enregistrement, le nombre de lectures et l'intervalle des lectures sont modifiables. Le choix d'une moyenne calculée aux 10 minutes est un standard en météorologie et de l'intervalle d'enregistrement de 20 minutes permet d'augmenter la densité des données. L'enregistrement des données à toutes les 20 minutes au lieu de 10 permet d'emmagasinier des données sur une plus grande période de temps tout en occupant le même espace mémoire que sur une période de 10 minutes.

Canaux	Description
1	Tension CA du générateur secondaire au diesel
2	Tension CA du générateur secondaire au diesel
3	Tension CC aux charges excédentaires
4	Courant CC aux charges excédentaires
5	Tension CA aux charges
6	Courant CA aux charges
7	Tension triphasée produite par l'éolienne
8	Courant triphasé produit par l'éolienne
9	Courant CC de recharge des batteries
10	Tension CC de recharge des batteries
11	Direction du vent
12	Vitesse du vent
13	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur éolien

**Tableau 1 Mesures des performances d'une éolienne de 10 kW de l'Université de Canterbury**

Le centre "Murdoch University Energy Research Institute" a développé une version Internet de leur système de démonstration d'énergie renouvelable appelé "remote area power supply" (RAPS) [5]. Cette application permet de visualiser les données météorologiques et les données électriques à l'aide d'un navigateur Internet. L'affichage des données est mis à jour à chaque seconde ce qui permet aux utilisateurs de voir le fonctionnement du système pratiquement en temps réel. L'étude a porté sur trois systèmes

comprenant des panneaux solaires de 300 W à 1,2 kW et des éoliennes de 300 W à 1,8 kW. Un système d'acquisition de données a été installé afin d'analyser les performances d'un des systèmes de production d'énergie. Il est conçu autour d'un Pentium 133 MHz (figure 1) et de la carte d'acquisition des données PCL-818 de la compagnie Advantech. Un programme en Visual C++ a été développé pour la collecte et le traitement des données. On utilise aussi le logiciel Labview pour le traitement et le transfert des données vers le serveur Web.



**Figure 1 Diagramme WebRAPS Murdoch University**

Le département de génie électronique et de génie informatique de l'Université Technique de Crete en Grèce [7] a développé un système de supervision et d'évaluation de l'opération de sources d'énergie renouvelable avec un serveur de base de données (Renewable Energy Sources). Les paramètres météorologiques et d'opération de plusieurs RES sont mesurés et transmis en temps réel à un serveur de base de données. Les clients à

distance ont accès à la base de données afin de créer des graphiques de tendance, des calculs statistiques et visualiser les paramètres d'opérations des RES.

### **Originalité de la recherche**

Tel que mentionné précédemment, l'objectif de la recherche est de développer un système de supervision et d'acquisition de données d'une éolienne de moyenne puissance par le réseau Internet. Ayant choisi de développer autant que possible le matériel et les logiciels, l'atteinte de l'objectif doit passer par des connaissances dans plusieurs domaines particuliers : l'énergie éolienne, l'électricité, l'électronique et l'informatique. Ainsi, pour le domaine éolien des connaissances sont nécessaires sur le traitement statistique des données météorologiques, les caractéristiques du vent, l'échantillonnage des données et le choix des équipement de mesure des données météorologiques. Du côté électrique et électronique des connaissances sont requises sur les caractéristiques électriques des éoliennes, la conception de circuit de traitement de signaux électroniques, l'interfaçage de circuits électroniques et le choix des capteurs de mesure des caractéristiques électriques d'une éolienne. Finalement, en informatique, des connaissances sont requises pour le développement de page HTML, la programmation en C d'un microcontrôleur pour le système d'acquisition de données, la programmation en Java de l'interface utilisateur par Internet et la collecte des données, la programmation côté serveur et le développement du système de requêtes des clients par Internet.

# **CHAPITRE 1**

## **SUPERVISION PAR INTERNET**

### **1.1 Introduction**

Un des principaux avantages d'Internet est la possibilité d'avoir accès en tout temps à de l'information à jour, indépendamment de la situation géographique de la source d'information et de l'utilisateur. De ce fait, ce moyen devient un outil intéressant pour la diffusion d'informations sur une échelle globale. Le Groupe Éolien de l'Université du Québec à Rimouski a mis en place un projet visant l'utilisation de l'Internet pour diffuser, auprès du public, les paramètres et caractéristiques d'une éolienne.

### **1.2 Internet**

Aux débuts de l'informatique, des ordinateurs ont été mis au point et dès qu'ils furent aptes à fonctionner, des personnes eurent l'idée de les relier entre eux afin qu'ils puissent s'échanger des données. Ainsi, est né le concept de *réseau*. Il a fallu mettre au point des liaisons physiques entre les ordinateurs pour que l'information puisse circuler, mais aussi des normes de communication pour faciliter les échanges: les *protocoles*. Sur Internet, de nombreux protocoles sont utilisés, ils font partie d'un ensemble de protocoles appelé *TCP/IP*. Le protocole TCP/IP est basé sur le repérage de chaque ordinateur par une adresse



unique appelée *adresse IP*. Ces adresses sont associées à des noms de domaine pour les mémoriser plus facilement.

Des réseaux hétérogènes (de types différents) se sont développés aux quatre coins du globe; des personnes décidèrent de relier ces réseaux entre eux comme, par exemple, ceux des universités ou de l'armée. Les protocoles ont évolué pour permettre la communication de tous ces réseaux afin de former le réseau des réseaux, une gigantesque toile d'araignée (en anglais "Web"), que l'on appelle Internet. Sur Internet, il existe différents protocoles qui permettent de faire différentes tâches, entre autres:

- PPP: faire communiquer deux ordinateurs par modem
- HTTP: accéder à des pages Web
- FTP client: transférer des fichiers

On assigne à chacun des protocoles un *port* qui est transmis lors de la communication. La transmission est effectuée par petits paquets d'informations. Chaque paquet contient l'adresse et le numéro de port de la destination. Ainsi, on sait à quel programme s'adresse chaque petit paquet. Les paquets HTTP arrivent généralement au port 80 et sont transmis au navigateur Internet à partir duquel la page a été appelée. Les paquets FTP arrivent, par défaut, au port 21 et sont transmis à un programme FTP client.

La carte réseau est l'élément physique de l'ordinateur qui lui permet de se connecter à un réseau. Le modem permet, lui, de se connecter à un réseau par l'intermédiaire des lignes

téléphoniques. Dans le cadre de ce projet l'utilisation d'un modem est une alternative dépendamment de la disponibilité d'une connexion haute vitesse sur le site de l'éolienne.

La connexion à Internet, par l'intermédiaire d'un modem, est différente de celle par une carte réseau. En effet, un modem permet d'établir une communication entre deux ordinateurs généralement par l'intermédiaire d'une ligne téléphonique. On peut avoir accès à Internet en contactant un serveur relié à une ou plusieurs lignes téléphoniques et, simultanément à un réseau par l'intermédiaire d'une carte réseau. Ce serveur appartient généralement à un fournisseur d'accès Internet (ISP). Lorsqu'on se connecte par son intermédiaire, il alloue une adresse IP libre qu'on garde le temps de la connexion. À chaque connexion, il attribuera arbitrairement une des adresses IP libres qu'il possède, celle-ci n'est donc pas une adresse IP fixe.

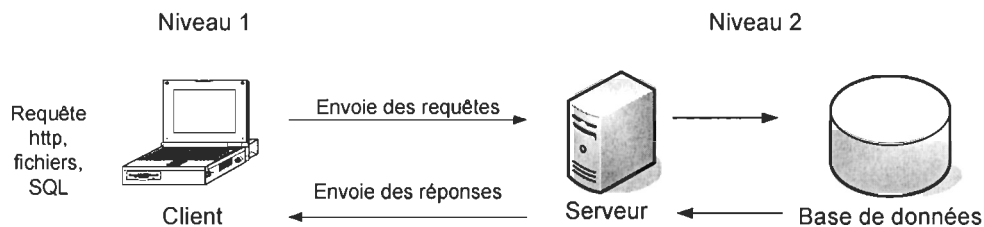
### **1.3 Modèle client / serveur**

Le modèle client /serveur est un concept très utilisé dans le monde des réseaux informatiques en général et dans les applications TCP/IP en particulier. Pour les protocoles des couches basses de TCP/IP, il n'y a pas de relation de maître à esclave, c'est-à-dire que toutes les machines se trouvent sur un même pied. Par contre, la plupart des applications utilisent un modèle client / serveur. Un serveur est un programme qui offre des services aux utilisateurs d'un système. Un client est un programme qui utilise les services d'un serveur.

Une application est donc constituée d'une partie serveur et d'une partie client, qui peuvent fonctionner sur la même machine ou sur des machines différentes reliées par un réseau.

Lorsqu'un client a besoin d'un service, il envoie une requête au serveur. Le serveur traite alors cette demande et renvoie une réponse au client. Les serveurs attendent les requêtes sur un port particulier qui leur est dédié. Les clients doivent donc savoir à quel port envoyer leurs requêtes. En général, un serveur peut traiter les requêtes de plusieurs clients à la fois. Un serveur est un programme, mais on appelle parfois serveur une machine servant à faire tourner des programmes serveurs.

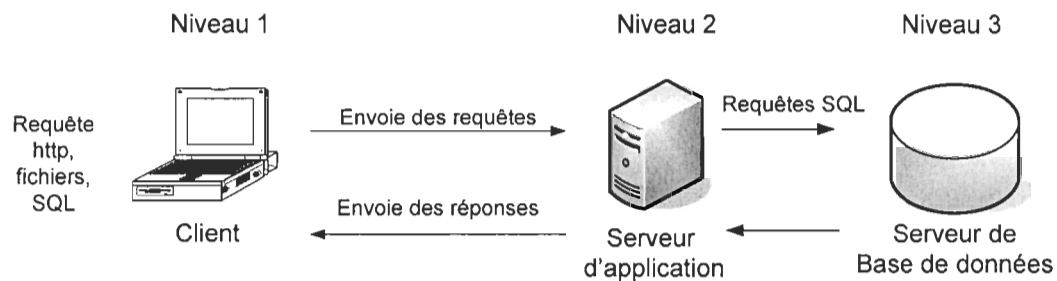
La plupart des applications de supervision par Internet, autant dans le domaine des énergies renouvelables que dans d'autres domaines, utilisent une architecture client / serveur 2-tiers et 3-tiers. L'architecture 2-tiers (figure 2) caractérise les systèmes clients/serveurs dans lesquels le client demande une ressource et le serveur la lui fournit directement. Cela signifie que le serveur ne fait pas appel à une autre application afin de fournir le service.



**Figure 2 Architecture 2-tiers**

Dans l'architecture 3-tiers (figure 3), il existe un niveau intermédiaire, c'est-à-dire que l'on a généralement une architecture partagée entre:

1. Le client: le demandeur de ressource;
2. Le serveur d'application: le serveur chargé de fournir la ressource mais faisant appel à un autre serveur;
3. Le serveur secondaire (généralement un serveur de base de données), fournissant un service au serveur d'application.



**Figure 3 Architecture 3-tiers**

L'architecture 2-tiers est donc une architecture client/serveur dans laquelle le serveur est polyvalent, c'est-à-dire qu'il est capable de fournir directement l'ensemble des ressources demandées par le client. Dans l'architecture 3-tiers, par contre, les applications au niveau serveur sont délocalisées, c'est-à-dire que chaque serveur est spécialisé dans une tâche (serveur web/serveur de base de données par exemple). Ainsi, l'architecture à trois niveaux permet:

1. une plus grande flexibilité et souplesse;
2. une plus grande sécurité (la sécurité peut-être définie pour chaque service);

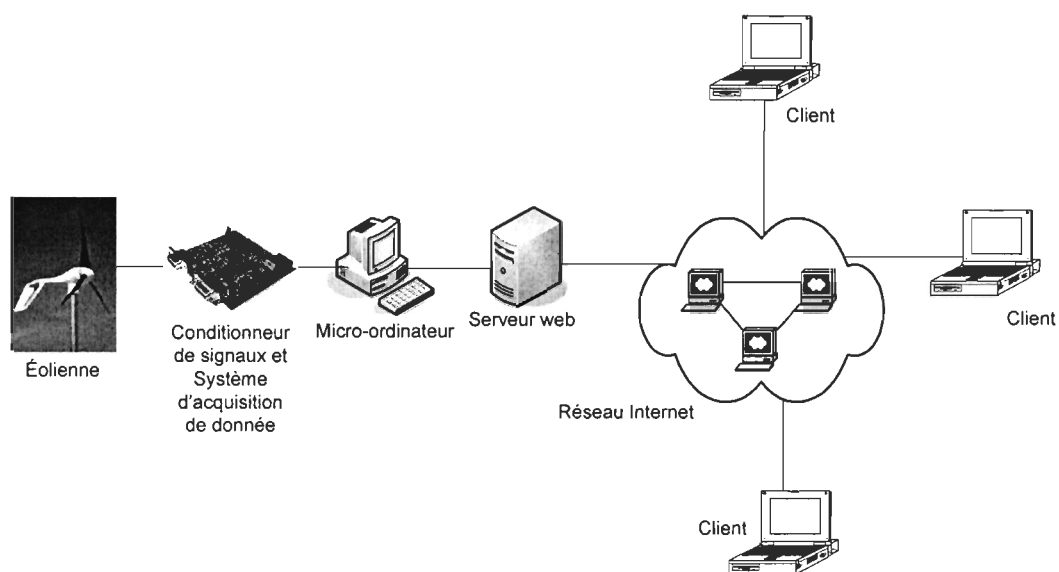
3. de meilleures performances (les tâches sont partagées).

#### **1.4 État de la recherche**

Pour réaliser un système de supervision d'une source d'énergie renouvelable par Internet, on a besoin de différents équipements et logiciels (figure 4):

1. instrumentation pour mesurer les différents paramètres de fonctionnement et les données météorologiques,
2. des circuits électroniques pour conditionner les signaux reçus de l'instrumentation et les rendre utilisables par une carte d'acquisition de données (circuits de conversion analogique à numérique),
3. un micro-ordinateur pour récupérer et emmagasiner les données et les transmettre à un serveur web,
4. un serveur web qui va fournir par Internet les données aux clients sous forme de pages graphiques, de graphiques de tendances historiques et de statistiques.

Le micro-ordinateur et le serveur web doivent être programmés afin de pouvoir effectuer ces tâches.



**Figure 4 Architecture d'un système de supervision par Internet**

Selon les objectifs du système de supervision, différentes mesures devront être effectuées sur le site de l'éolienne. Pour la mesure des performances d'une éolienne [1], il est nécessaire de mesurer la vitesse du vent, la direction du vent, la tension et le courant produit par la turbine. Dans le cas de la référence [1], la mesure de la vitesse et de la direction du vent est effectuée avec un capteur "Davis 7911" placé sur un mat de 10 mètres situé près de l'éolienne. La mesure de la vitesse de l'arbre de la turbine est effectuée en mesurant la fréquence de la tension alternative fournie par l'éolienne. Les différents signaux ont été conditionnés par des interfaces développées par l'Université de Canterbury.

Dans la référence [2], est décrit un système de supervision par Internet d'un diffractomètre<sup>8</sup>. Évidemment, la supervision par Internet s'applique aussi à d'autres domaines. Cet article a retenue notre attention par le langage de programmation utilisé pour le développement de l'architecture logicielle. L'application a été développée en langage Java à cause de ses avantages:

1. permet le développement d'application client / serveur, conçue spécifiquement pour les environnements distribués,
2. intègre des fonctionnalités réseau,
3. est très bien adapté pour les applications Internet.

En outre, Java est un langage orienté objet et il est indépendant de la plate-forme. Un applet Java s'exécute sur le micro-ordinateur du client et envoie une requête au serveur qui ouvre un "socket" et démarre une procédure permettant de gérer la communication. À chaque seconde, le serveur lit les données provenant de la station d'acquisition de données et les envoie aux clients.

Dans la référence [4], un microcontrôleur est utilisé pour l'acquisition de données d'un système photovoltaïque. Le microcontrôleur possède les fonctions permettant l'acquisition des données, leur traitement préliminaire et leur transfert quotidien à un micro-

---

<sup>8</sup> Le **diffractomètre** est un appareil permettant de mesurer la diffraction d'une onde sur une cible. Le terme est utilisé exclusivement pour la diffractométrie de rayons X.

ordinateur via un port série RS232C. Le traitement préliminaire des données consiste à transformer les valeurs numériques lues des convertisseurs en des valeurs numériques mise à l'échelle selon les unités physiques et à générer les moyennes horaires et journalières.

Dans plusieurs travaux de recherche, tel que [5], on utilise une architecture comme illustrée à la figure 4. Un micro-ordinateur dans lequel est installée une carte d'acquisition de données est utilisé afin de mesurer les paramètres de fonctionnement de l'éolienne (tension, courant, fréquence, etc.) et les données météorologiques (vitesse du vent, direction du vent, température, etc.). Le logiciel Labview est utilisé pour récupérer les données, les traiter et les transmettre au serveur web. Le micro-ordinateur est raccordé sur un réseau local Ethernet et transfère les données directement au serveur web. Le serveur web fournit aux clients l'affichage des données sur une page graphique. Les données sont mises à jour à chaque seconde, permettant ainsi à l'utilisateur de visualiser le fonctionnement du système presque en temps réel. Il est aussi possible de visualiser un graphique de tendance historique de la variation des paramètres pendant les dernières 24 heures.

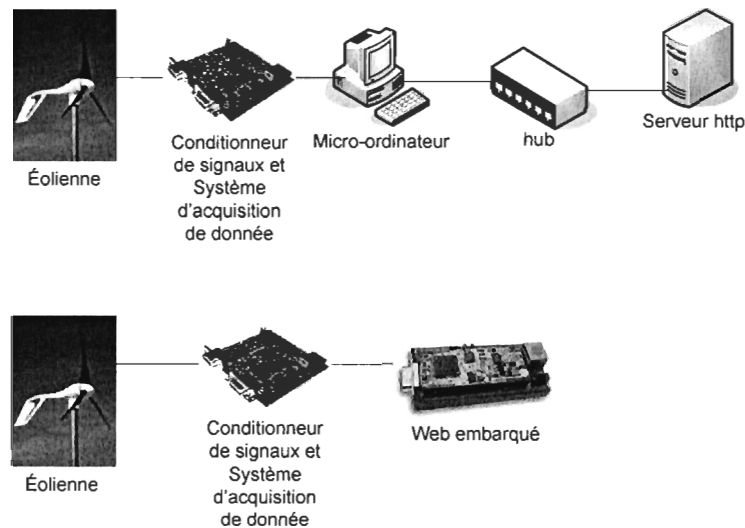
La plupart des systèmes de mesure suivent l'architecture de client/serveur, conformément à la figure 4. Selon cette architecture, un ou plusieurs instruments sont reliés à une station de mesure ou d'acquisition de données, qui fonctionne comme serveur, alors que les données acquises sont disponibles par un réseau aux clients.



Internet permet aux chercheurs [2] d'avoir accès à distance aux informations sur le fonctionnement de l'équipement, au traitement et à l'analyse des données à l'aide d'une interface en html et, facilite ainsi la collaboration. L'interface doit être indépendante de la plate forme, rapide, facile d'utilisation, utile et accessible. On désire connaître en temps réel l'état du système. Pour des raisons de sécurité, et afin de faciliter le contrôle d'accès, il ne doit pas y avoir de communication directe entre le système de contrôle et le client. Une attention est portée pour minimiser l'utilisation de la bande passante du réseau.

### **1.5 Analyse des solutions**

La plupart des travaux de recherche récents dans le domaine de la supervision et de l'acquisition de données par Internet utilisent une architecture client / serveur. Un micro-ordinateur, situé sur le site, s'occupe de récupérer les données provenant d'une carte d'acquisition. Ce micro-ordinateur fournit les données à un serveur HTTP connecté au réseau Ethernet. Le serveur HTTP se charge ensuite de rendre les données disponibles aux clients. Depuis peu, la technologie du web embarqué est disponible. Ainsi, nous pouvons remplacer le micro-ordinateur installé sur le site, par un système avec microcontrôleur offrant la technologie web embarquée (figure 5).



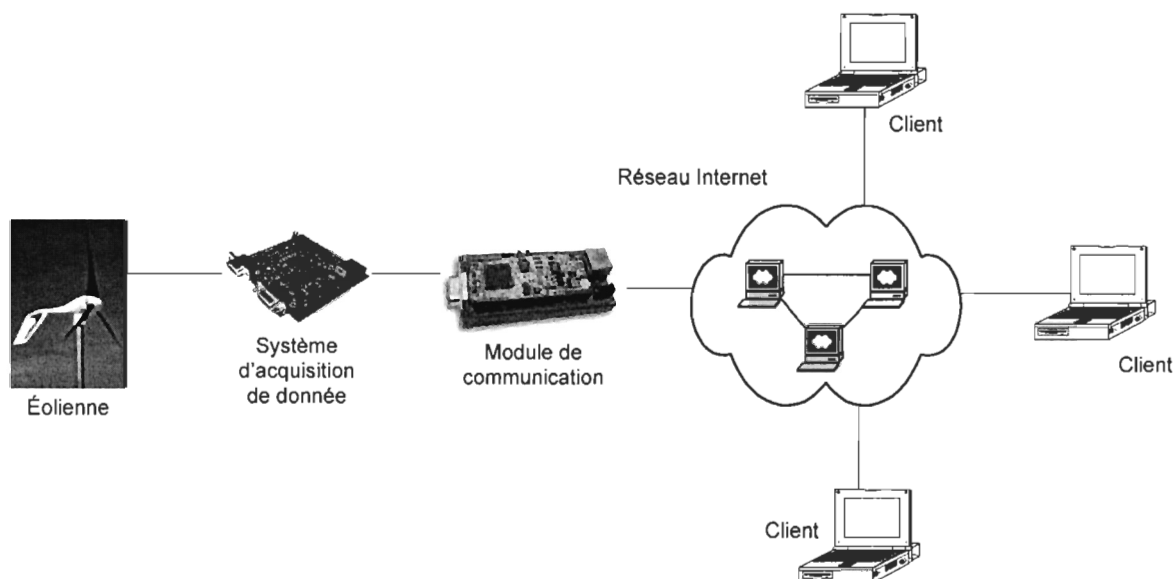
**Figure 5 Comparaison Web embarqué**

Un serveur Web embarqué permet d'administrer et de contrôler à distance tout équipement (distributeur automatique, compteur électrique, panneau lumineux ...) à partir d'un navigateur Internet. La procédure est simple, on peut créer un site Internet spécifique à chaque machine puis le consulter afin de récupérer des données à tout instant et depuis n'importe quel PC connecté à Internet. Le serveur web embarqué connecte directement l'équipement à Internet, sans avoir recours à un PC.

Comme plusieurs architectures peuvent être utilisées afin de répondre aux besoins de supervision par Internet d'une centrale éolienne, nous allons explorer les avantages et les inconvénients des solutions possibles.

### 1.5.1 Solution #1

L'architecture du premier système est représentée à la figure 6.



**Figure 6 Architecture de la solution #1**

Le premier système proposé se décrit comme suit: un système d'acquisition de données recueille les paramètres météorologiques et électriques de l'éolienne par l'intermédiaire de l'instrumentation qui sera décrite au chapitre 3. Le système d'acquisition de données est réalisé à partir d'un système de développement commercial conçu autour d'un microcontrôleur. Un module de communication comprenant la pile des protocoles TCP/IP permet au microcontrôleur de transférer les données par son port série RS232C vers le réseau Ethernet. Ce système est décrit en détail au chapitre 4. Le module de communication possède un serveur HTTP et il est possible d'y insérer des pages html. Le microcontrôleur devra mettre à jour les données disponibles sur la page html. Un applet

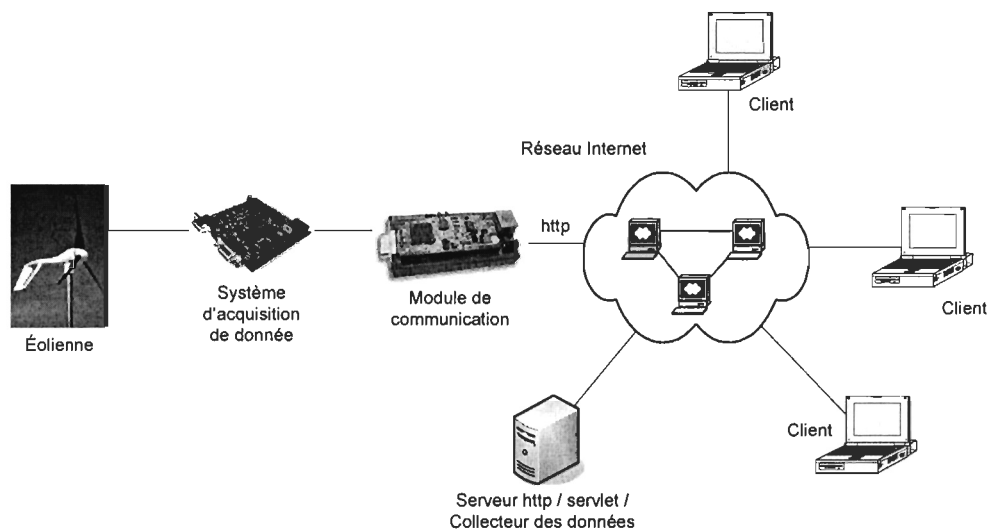
Java avec une interface graphique peut être intégré sur le serveur HTTP et téléchargé par le client pour visualiser les données par internet.

Le principal problème avec ce type de système est que le serveur HTTP ne permet l'ouverture que d'une session à la fois. Pour accéder aux données, on utilise le protocole HTTP, le client fait une requête, le serveur répond à celle-ci et la session se termine. Pour pallier un peu à ce problème, il faut qu'à partir de l'applet Java, le client ne fasse une requête qu'à chaque 4 secondes. Puisque le fichier de données n'est pas volumineux (environ 400 octets), ce temps est suffisant pour répondre aux requêtes des clients.

Finalement, ce système ne permet pas le stockage et la transmission de l'historique des données. Un microcontrôleur possède généralement une mémoire limitée, et ne peut conserver les données que quelques jours. Une solution consiste à sauvegarder les données dans un ou plusieurs fichiers sur le poste du client lorsqu'il est connecté mais ces données ne seraient disponibles qu'au client concerné. De plus, à cause des dispositifs de sécurité de Java, il n'est pas permis pour un applet d'enregistrer des données sur le disque dur d'un client à moins de signer l'applet et que le client accepte que le signataire soit digne de confiance.

### **1.5.2 Solution #2**

L'architecture du deuxième système est représentée à la figure 7.



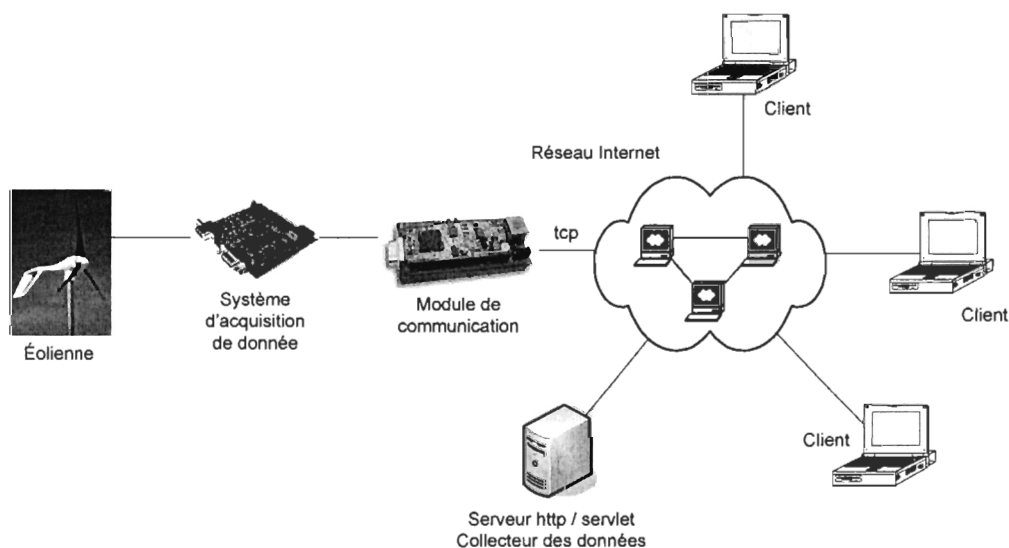
**Figure 7 Architecture de la solution #2**

Ce système est une amélioration du système précédent. Il faut ajouter un serveur externe HTTP / servlet qui se charge de récupérer les données de l'éolienne et de les archiver dans un ou plusieurs fichiers ou dans une base de données. Lorsqu'un client veut consulter les données historiques, il doit faire une requête à ce serveur externe. Il y deux alternatives pour fournir les données presque en temps réel aux clients. Comme précédemment, le client peut placer une requête directement au serveur HTTP du module de communication ou bien envoyer cette requête au serveur externe. Il faut tenir compte de la charge imposée au serveur HTTP du module de communication pour faire le bon choix. Évidemment, la récupération directe, comme dans le cas du système #1, demande moins de programmation sur le serveur externe mais impose une charge accrue au serveur HTTP du module de communication.

La deuxième option, celle de passer par le serveur externe, offre une autre particularité intéressante, elle permet d'interdire l'accès direct au serveur HTTP de l'éolienne et amène ainsi une certaine protection (sécurité). Étant donné que le serveur externe est utilisé comme intermédiaire, il récupère les données de l'éolienne et les réexpédie aux clients. Il y a donc un délai dans les communications. Mais ce n'est pas vraiment un problème puisque l'objectif n'est pas de visualiser les données en temps réel sur un poste client.

### 1.5.3 Solution #3

L'architecture du troisième système est représentée à la figure 8.



**Figure 8 Architecture de la solution #3**

Cette configuration ne représente rien de différent par rapport à la précédente au niveau des équipements utilisés. La différence se situe au niveau des protocoles utilisés

pour récupérer les données. Le module de communication possède la pile des protocoles TCP/IP. Le module de communication est configuré en mode serveur TCP et attend que le serveur HTTP /servlet récupère les données. Les clients récupèrent les données directement du serveur externe HTTP.

## **1.6 Synthèse**

Après l'analyse des avantages et des inconvénients des trois solutions, la solution #2 semble répondre plus exactement à la problématique de notre application. Cette solution permet de gérer plusieurs connections avec des clients car le serveur externe HTTP /servlet est un micro-ordinateur et non un serveur web embarqué. De plus, ce serveur peut-être installé à n'importe quel endroit avec une connexion Internet haute vitesse. Seul ce serveur communique avec la station d'acquisition des données de l'éolienne. La solution #3 a été écartée car le développement de l'application dans la station d'acquisition de données est assez complexe et les avantages sont limités.

Nous présentons dans le tableau 2 une synthèse des avantages et des inconvénients des trois solutions analysées.

	Avantages	Inconvénients
Solution #1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Web embarqué</li> <li>• Faible complexité du programme du microcontrôleur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gère une seule requête HTTP à la fois</li> <li>• Aucun historique des données</li> </ul>
Solution #2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gère plusieurs requêtes HTTP simultanément</li> <li>• Historique de données disponibles</li> <li>• Accès indirect au serveur HTTP de l'éolienne (sécurité)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement d'une application de collecte et d'archivage des données</li> <li>• Besoin d'un serveur HTTP</li> <li>• Développement d'un servlet pour la communication avec les clients</li> </ul>
Solution #3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gère plusieurs requêtes HTTP</li> <li>• Historique de données disponibles</li> <li>• Accès indirect au serveur HTTP de l'éolienne (sécurité)</li> <li>• Échange des données plus rapide (tcp)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement d'une application de collecte et d'archivage des données</li> <li>• Besoin d'un serveur HTTP /servlet</li> <li>• Complexité du programme du microcontrôleur</li> <li>• Développement d'un servlet pour la communication avec les clients</li> </ul>

Tableau 2 Synthèse des solutions

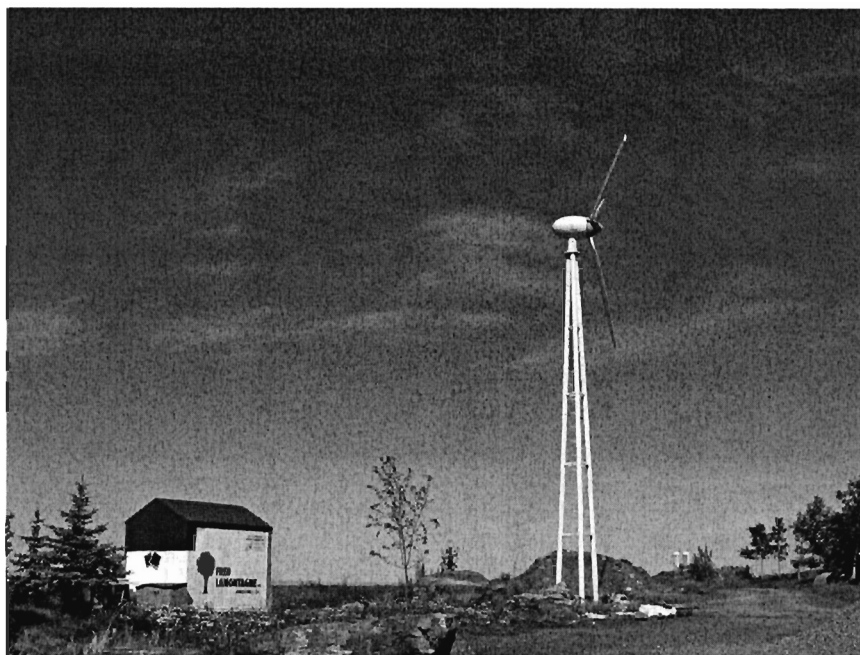


## **CHAPITRE 2**

### **CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SYSTÈME**

#### **2.1 Introduction**

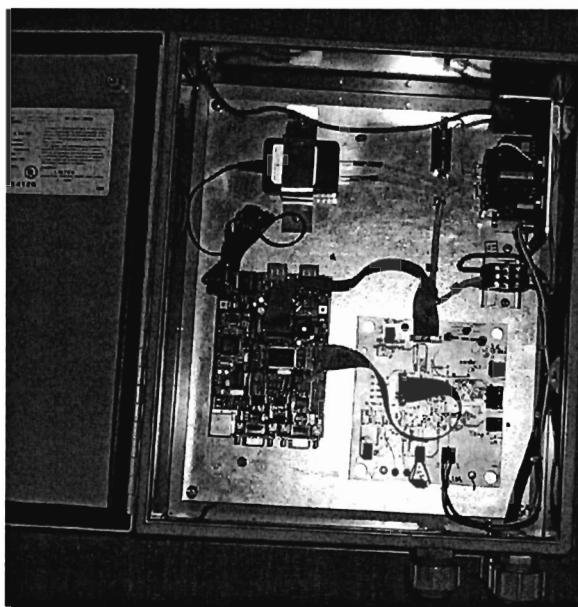
La compagnie Plastiques Gagnon Inc. (PGI) a développé, en collaboration avec le Groupe Éolien de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et Audace Technologies Inc. (ATI Éolien), une première centrale éolienne de moyenne puissance composée d'une turbine éolienne avec son rotor, d'une tour, des panneaux électriques de puissance, des systèmes électroniques de contrôle et des équipements auxiliaires. Une version expérimentale de l'éolienne de 35 kW (voir figure 9) est installée à Rimouski et alimente des charges dédiées chez un horticulteur de la région. Afin de permettre au grand public d'avoir accès en temps réel à des données sur le fonctionnement de cette éolienne et dans le but de démontrer sa viabilité commerciale à des clients potentiels, PGI a demandé à ATI Éolien de faire une proposition pour le développement d'un système de supervision par Internet qui permettrait un accès en tout temps aux données de cette éolienne.



**Figure 9 Photographie des installations**

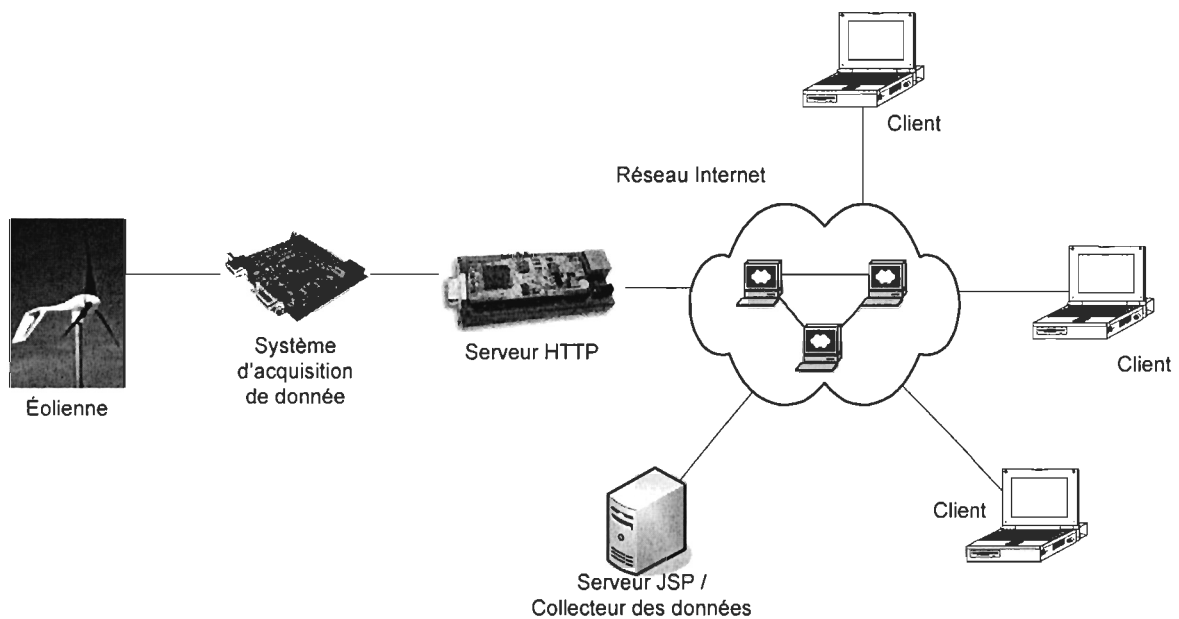
## **2.2 Architecture de l'application**

Sur le site de l'éolienne, un réseau Ethernet à haute vitesse a été installé afin de permettre le raccordement à l'Internet du système de supervision et de la caméra. Un système d'acquisition collecte les données météorologiques telles que la vitesse et la direction du vent, la température, ainsi que les paramètres électriques – la tension, le courant et la fréquence de la tension produite par la génératrice. Le module d'acquisition de données communique par un port série avec un module de communication qui supporte un serveur HTTP. Les paramètres mesurés sont transmis à intervalle régulier via le port série au module de communication. Le serveur HTTP récupère ces données. Ces données peuvent ensuite être récupérées sur le réseau Internet.



**Figure 10 Photographie du panneau de supervision**

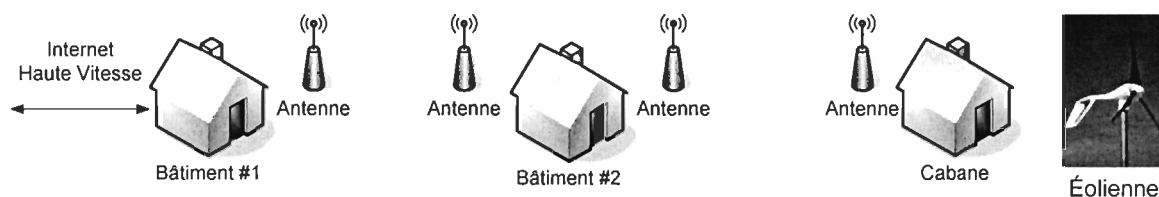
Un micro-ordinateur raccordé au réseau Internet est chargé de récupérer les données du serveur HTTP du site de l'éolienne et de les emmagasiner dans une base de données. Un logiciel de serveur JSP/servlet est installé dans ce micro-ordinateur afin de répondre aux requêtes des utilisateurs. Lorsqu'un utilisateur communique avec le serveur JSP, il télécharge un applet qui va supporter l'interface utilisateur. Cette interface permet aux utilisateurs de visualiser les données actuelles reçues du site de l'éolienne. L'interface permet aussi de placer des requêtes à la base de données pour visualiser des données historiques, des statistiques et des courbes de tendances.



**Figure 11 Architecture de l'application**

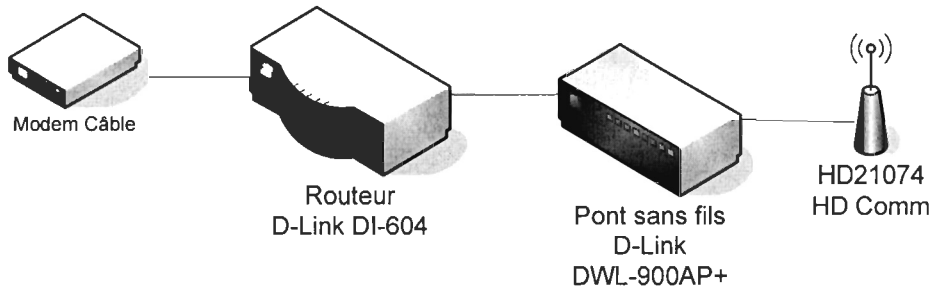
### **2.3 Réseau interne (Intranet)**

Le premier problème rencontré a été l'installation d'un lien Internet haute vitesse sur le site. Une cabane est construite près de l'éolienne dans laquelle sont installés les équipements de contrôle et de supervision (figure 12). Cet emplacement n'offre aucun lien direct, par fil conducteur, à Internet haute vitesse. L'installation d'un réseau sans fil a permis de relier les équipements à Internet. Il est nécessaire d'utiliser le bâtiment #2 comme relais car l'antenne de la cabane n'est pas à vue de celle du bâtiment #1 (figure 12). La distance maximum entre les bâtiments ne doit pas excéder 500 mètres pour ce type de réseau.



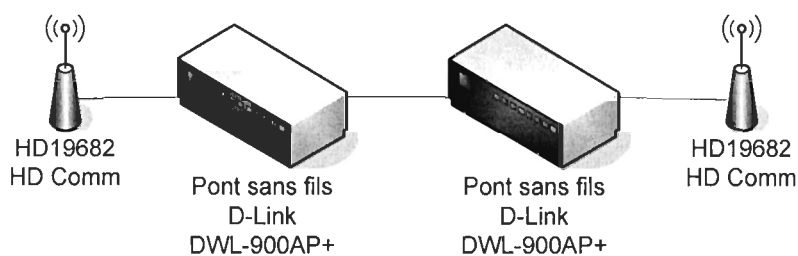
**Figure 12 Configuration du réseau sans fil**

Dans le bâtiment #1 sont installés le modem câble, le routeur et le pont d'accès sans fil (figure 13). Le modem câble permet l'accès à Internet haute vitesse. Le routeur permet d'interconnecter le réseau Internet au réseau local du site. Le routeur possède donc deux adresses IP afin de pouvoir communiquer sur ces deux réseaux. Le pont ("Bridge") sans fil s'occupe de relier le réseau à celui du bâtiment #2. Une antenne bidirectionnelle 14 dBi est utilisée.



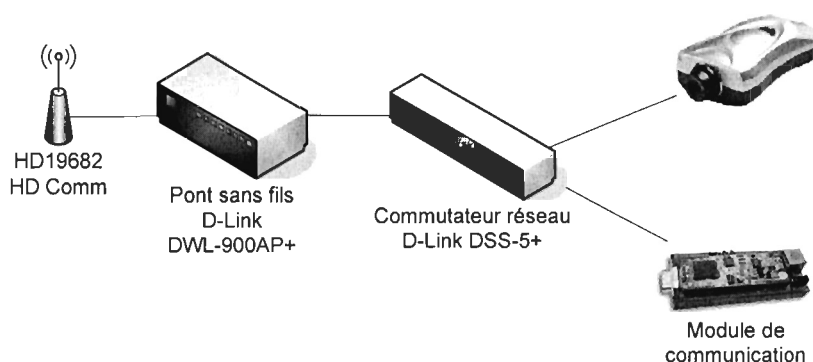
**Figure 13 Équipements de réseau sans fil bâtiment #1**

Dans le bâtiment #2 sont installés deux ponts d'accès sans fil (figure 14). Ces ponts sans fil permettent de relier le réseau du bâtiment #1 à celui de la cabane.



**Figure 14 Équipements du réseau sans fil bâtiment #2**

Dans la cabane sont installés un pont sans fil, un commutateur réseau ("switch"), la caméra réseau et le module de communication (figure 15). Le pont permet comme précédemment de relier les réseaux. Le commutateur permet de connecter les équipements de supervision et de communication.



**Figure 15 Équipements du réseau sans fil dans la cabane**

## **2.4 Configuration du routeur et des adresses IP**

Pour rendre accessibles la supervision et l'acquisition des données sur le réseau, il faut allouer des adresses IP à la caméra et au module de communication. De plus, étant

donné que ces dispositifs sont sur un réseau local, il faut configurer le routeur pour les rendre accessible à partir d'Internet.

Le tableau 3 présente la configuration des adresses IP et des ports pour les équipements utilisés.

Équipements	Internet		Intranet	
	Adresse IP	Port	Adresse IP*	Port
Routeur	24.122.50.17	8080	192.168.0.1	80
Serveur HTTP Caméra IP	24.122.50.17	1130	192.168.0.11	80
Socket transfert Image de la caméra IP	24.122.50.17	8020	192.168.0.11	8020
Serveur HTTP Module de communication	24.122.50.17	8021	192.168.0.12	80
Serveur Telnet Module de communication	24.122.50.17	8023	192.168.0.12	23

**Tableau 3 Configuration des adresses IP et des ports du réseau**

\* Ces adresses sont de classe C pour usage privé. Toute autre adresse de type C pour usage privé aurait pu être utilisé.

## **2.5 Système d'acquisition de données et de communication**

Le système d'acquisition de données est construit autour d'un ensemble de développement avec microcontrôleur H8S2633F de la compagnie Renesas (figure 16). Il sert à mesurer des signaux provenant du panneau de puissance et de contrôle de l'éolienne.

La mesure de la tension, de la fréquence et du courant s'effectue dans le panneau de puissance et les informations sur l'état de l'éolienne sont reçues du panneau de contrôle. Les mesures météorologiques s'effectuent grâce à des capteurs installés sur une tour en place sur le toit de la cabane. On y mesure la vitesse du vent, sa direction ainsi que la température extérieure. Pour que ces signaux soient compréhensibles par le microcontrôleur, on doit utiliser une carte d'interface qui conditionne ces signaux. Les détails sur ces instruments et sur la carte d'interface sont donnés au chapitre 3.

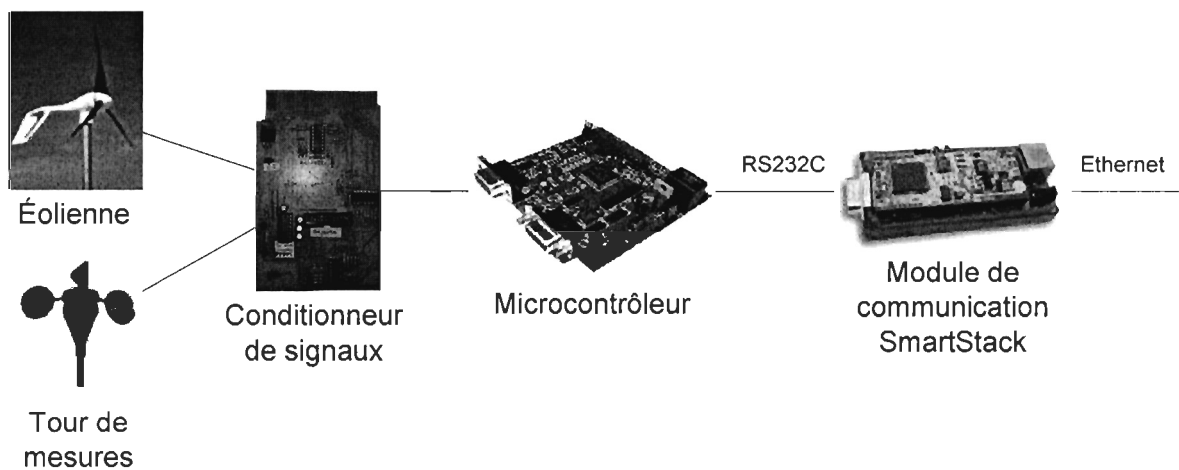


Figure 16 Système d'acquisition de données et de communication

## 2.6 Caméra IP

La caméra a pour but de rendre possible la visualisation de l'éolienne par Internet. Une caméra de surveillance se connectant sur un réseau Internet est idéale pour cette application. Cette caméra se connecte sur un réseau Internet et supporte jusqu'à 43 utilisateurs simultanément. La visualisation des images en direct se fait par l'intermédiaire



d'un navigateur Internet grâce à un applet Java. La caméra intègre un serveur web HTTP, ce qui évite l'utilisation d'un micro-ordinateur pour la raccorder au réseau. La fiche technique de la caméra est disponible en annexe II et les détails techniques de la communication sont donnés au chapitre 3.



**Figure 17** Caméra réseau Internet Intellinet Series 550710

## **CHAPITRE 3**

### **MESURES ET INSTRUMENTATION**

#### **3.1 Mesure de la vitesse du vent**

Le vent est caractérisé par sa vitesse, mesurée à l'aide d'un anémomètre et par sa direction, donnée par une girouette. La vitesse moyenne du vent est l'indicateur le plus important sur la ressource éolienne disponible sur ce site. La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent. L'énergie du vent varie avec le cube de la vitesse<sup>9</sup>. Ainsi, le double de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de  $2^3$ , soit 8 fois.

La mesure de la ressource éolienne sur un site se réalise le plus souvent à l'aide d'un anémomètre en haut d'un mât dont la hauteur correspond à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue. De cette façon, on évite l'incertitude liée à l'estimation de la vitesse du vent à une hauteur donnée à partir de mesures faites à une hauteur différente. L'installation de l'anémomètre en haut du mât réduit au minimum le risque de perturbations de l'écoulement de l'air causées par le mât lui-même. En cas d'installation de l'anémomètre sur

---

<sup>9</sup> Équation 2.2.8, Wind Energy Explain, JF Manwell, JG McGowan, AL Rogers, Wiley 2002.

un des côtés du mât, il devient important de le placer dans la direction dominante du vent afin de minimiser l'effet d'abri créé par le mât.

### **3.1.1 Échantillonnage des données**

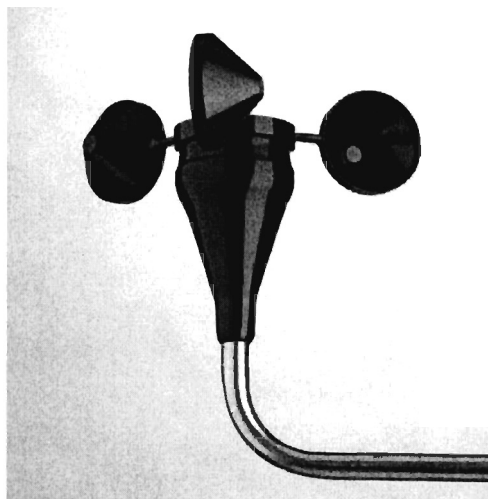
La mesure de la vitesse du vent doit se faire à chaque une ou deux secondes et on doit enregistrer la moyenne, l'écart type et les vitesses maximale et minimale sur un intervalle donné. En général, la vitesse du vent enregistrée est la moyenne des vitesses conservées pendant un intervalle de 10 minutes qui est maintenant la période standard internationale pour la mesure des vents. Les valeurs moyennes sont aussi utilisées pour évaluer la distribution des fréquences d'apparition de chaque valeur de la vitesse du vent. L'écart type est calculé pour chaque échantillon. Ces écarts types de la vitesse du vent sont des indicateurs du niveau de turbulence et de la stabilité atmosphérique. L'écart type est également utile pour la détection de données suspectes ou erronées lors de la validation des valeurs moyennes. Les valeurs maximale et minimale doivent être déterminées à chaque jour. Ces valeurs sont obtenues des lectures prises à chaque une ou deux secondes. Il faut aussi enregistrer la direction du vent à l'instant des valeurs maximale et minimale.

En principe, on pourrait utiliser d'autres intervalles de mesure ou d'enregistrement des données. Le choix d'une période de 10 minutes pour calculer la moyenne est une convention. Des périodes plus courtes ou plus longues peuvent être appropriées dans des circonstances particulières. L'avantage de la période de 10 minutes est qu'elle est

habituellement assez longue pour amortir certaines turbulences non significatives dans l'analyse d'un site. En même temps, cette période est assez courte pour enregistrer les changements significatifs qui se produisent pendant une tempête ou des situations de forts vents en rafales pouvant durer entre 5 et 30 minutes. Cependant, le choix de l'intervalle n'est pas sans importance pour la vitesse du vent. En fait, la période idéale est celle qui permettra d'enregistrer le type de turbulence à considérer pour une application donnée. Ainsi, la période de 10 minutes s'est avérée offrir cette particularité pour la plupart des applications en énergie éolienne.

### **3.1.2 Instrumentation**

La mesure de la vitesse du vent s'effectue le plus souvent à l'aide d'anémomètres à coupelles (figure 18). Ce type d'anémomètre se compose de trois ou quatre coupelles reliées à un axe vertical. Au moins une coupelle fait ainsi face au vent. La forme aérodynamique des coupelles convertit la force de pression du vent en couple de rotation. La rotation des coupelles est presque linéairement proportionnelle à la vitesse du vent à l'intérieur d'une échelle donnée. Un capteur convertit ce mouvement de rotation en signal électrique. La détermination de la vitesse du vent par un circuit électronique consiste à mesurer la fréquence de rotation des coupelles et, après étalonnage, la vitesse en mètres par seconde.



**Figure 18 Anémomètre de type NRG #40**

D'autres types d'anémomètres peuvent être utilisés: les anémomètres à ultrasons ou à laser qui enregistrent les changements de phase du son ou de la lumière réfléchis par les molécules de l'air (effet Doppler), les anémomètres à fil chaud qui enregistrent la vitesse du vent en comparant à chaque minute les écarts de température existant entre les fils chauds placés du côté du vent et ceux placés du côté sous le vent. Plus le vent est fort, plus le fil sous le vent se refroidit. L'avantage principal de l'emploi d'anémomètres non mécaniques est une réduction de la sensibilité au gel. Dans la pratique, l'anémomètre à coupelles s'utilise cependant partout et des modèles spéciaux munis d'arbres et de coupelles chauffés ont été conçus pour les régions arctiques.

Lors du choix d'un anémomètre, il faut prendre en considération certaines caractéristiques. Les anémomètres destinés à des applications de faible vitesse de vent, telle que l'étude de la pollution atmosphérique, sont habituellement faits de matériaux légers.

Ceux-ci ne sont pas appropriés aux environnements très venteux ou glaciaux. Le seuil minimum ("threshold") est la vitesse minimum à laquelle l'anémomètre démarre et maintient sa rotation. Pour l'éolien, il est plus important que l'anémomètre survive à une rafale de vent de  $25 \text{ m/s}$  que sa sensibilité aux vents soit en dessous de  $1 \text{ m/s}$ . La constante de distance ("distance constant") est la distance de déplacement de l'air, dépassé l'anémomètre, durant le temps que les coupelles prennent pour atteindre 63% de la vitesse finale après un changement de la vitesse du vent. Cette valeur donne une indication sur le temps de réponse de l'anémomètre à un changement de vitesse de vent. Une grande constante de distance est habituellement associée à des anémomètres plus lourds, avec une inertie plus grande, qui prennent plus de temps pour ralentir quand le vent diminue. Ces anémomètres peuvent surestimer la vitesse du vent. On doit aussi tenir compte de la fiabilité et de l'entretien des anémomètres, la plupart ont une durée de vie de 2 ans et plus sur leur roulement à bille.

Un anémomètre très populaire est le NRG#40 de la compagnie NRG. Il a démontré une fiabilité à long terme et une stabilité de sa calibration. Les coupelles sont faites de polycarbonate noir moulé. L'assemblage est fixée à un axe durci en cuivre et béryllium qui utilise un roulement sur billes modifié en téflon. Ce roulement sur billes n'a besoin d'aucun entretien et demeure précis pendant au moins deux ans dans la plupart des environnements. Cet anémomètre est capable de fournir une lecture de la vitesse du vent entre  $1$  et  $96 \text{ m/s}$ . Le signal de sortie obtenu est une onde sinusoïdale de faible amplitude dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du vent. Il possède un seuil de  $0,78$  mètre par seconde et une constante de distance de 3 mètres.



**Figure 19** Caractéristique de l'anémomètre NRG #40

La vitesse du vent se calcule à partir de la fréquence du signal mesuré à la sortie du capteur (figure 19) selon l'équation:

$$vitesse(m/s) = (f(Hz) * 0.765) + 0.35$$

**Équation 1** Conversion de la vitesse du vent en m/s.

Pour convertir des mètres par seconde (m/s) en kilomètres par heure (km/h), il faut utiliser la relation suivante:

$$vitesse\left(\frac{km}{h}\right) = 3.6 * vitesse\left(\frac{m}{s}\right)$$

**Équation 2** Conversion de la vitesse du vent de m/s à km/h.

Le NRG#40 est capable de mesurer la vitesse du vent jusqu'à 345  $km/h$ , ce qui est largement suffisant. Dans le tableau 4 sont présentées les correspondances entre la fréquence du signal fourni par l'anémomètre et la vitesse du vent en  $m/s$  et en  $km/h$ .

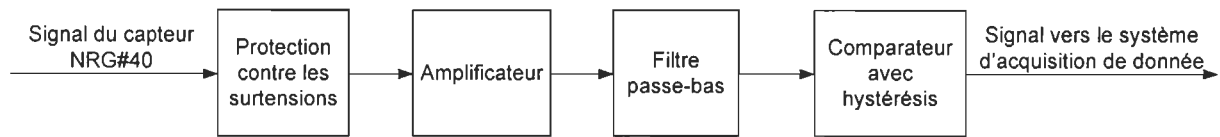
fréquence (Hz)	Vitesse du vent	
	m/s	km/h
0	0,35	1,26
10	8	28,8
20	15,65	56,34
35	27,13	97,65
125	95,98	345,51

**Tableau 4** Correspondances entre la fréquence indiquée par  
l'anémomètre NRG #40 et la vitesse du vent

### **3.1.3 Conditionneur de signal**

Le capteur NRG#40 fournit à sa sortie une onde sinusoïdale de faible amplitude dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du vent. Selon le manufacturier, pour un vent d'environ 1  $m/s$  l'amplitude du signal sinusoïdal sera au minimum d'environ 80 millivolt pointe à pointe (40 millivolt maximum) avec une fréquence de 0,85 Hz et pour un vent de 96  $m/s$  l'amplitude du signal sera au maximum de 12 volts pointe à pointe (typiquement 9 volts pointe à pointe) avec une fréquence de 125 Hz. Ce signal doit être converti en onde carrée variant de 0 à 5 volts avec une fréquence variant entre 0,85 et 125 Hz pour être récupéré par le système d'acquisition de données.





**Figure 20 Schéma bloc du conditionneur de signal pour la mesure de la vitesse du vent**

Le conditionneur de signal (figures 20 et 21) doit fournir une protection contre les surtensions. L'utilisation d'une varistance à l'oxyde de métal (MOV) permet de protéger le circuit contre les surtensions passagères. Un amplificateur d'instrumentation ayant une grande résistance d'entrée et un gain en tension de 2 permet la mesure de vents faibles. Pour enlever le bruit à l'entrée à haute fréquence, il est nécessaire d'ajouter un filtre passif passe bas afin d'atténuer le signal durant les forts vents. La diode D1 protège le LM339 contre les inversions de polarité du signal à l'entrée. Il faut préciser que le signal à l'entrée ne doit pas dépasser 5 volts pointe car le LM339 pourrait cesser de fonctionner. Il n'y a pas de problème ici, car il faudrait un vent de 191 Km/h. Le comparateur permet de convertir le signal sinusoïdal en onde carré variant de 0 à 5 volts.

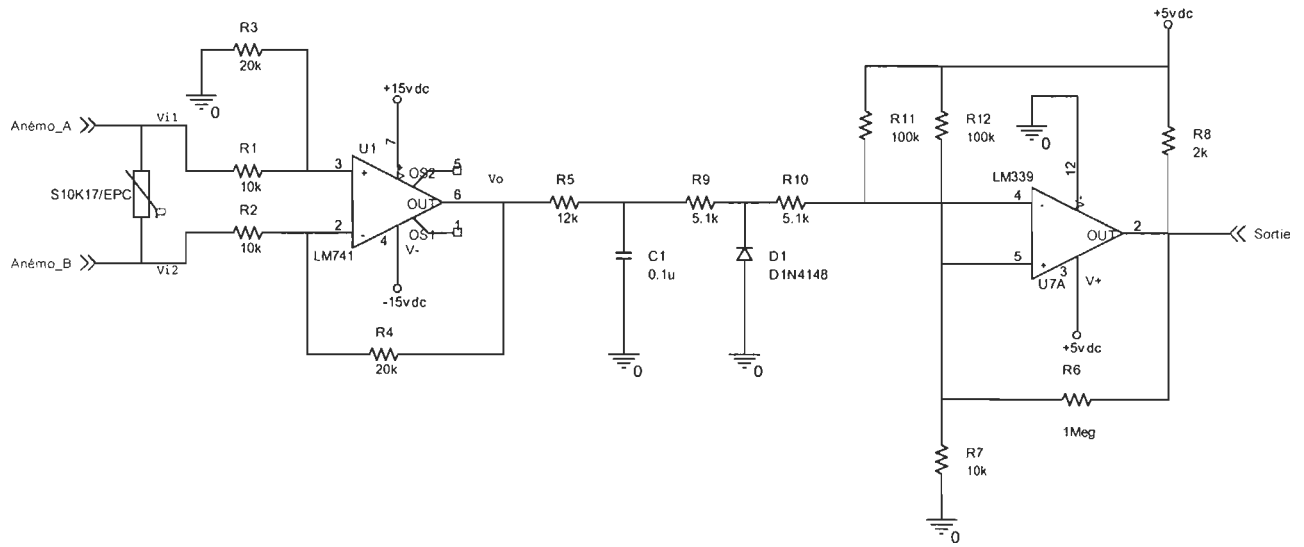


Figure 21 Schéma électrique du conditionneur de signal pour la mesure de la vitesse du vent

Le seuil de déclenchement du comparateur doit être ajusté assez bas afin de détecter les faibles signaux pendant les vents faibles, ce qui est moins susceptible d'arriver étant donné que le signal à l'entrée est amplifié. Le comparateur doit aussi avoir une hystérésis afin de diminuer sa sensibilité au bruit autour du passage par zéro. L'hystérésis consiste à établir un niveau de référence plus élevé lorsque la valeur de la tension d'entrée augmente que lorsqu'elle diminue. Les deux niveaux de référence sont appelés le point de déclenchement supérieur (PDS) et le point de déclenchement inférieur (PDI). Le circuit utilisé est un comparateur avec hystérésis utilisant une rétroaction positive.

$$V_{PDS} = \left( \frac{R_7}{R_6 + R_7} \right) * (+V_{lim}) = \left( \frac{10k}{10k + 1M} \right) * 5 = 49.5 \text{ millivolt}$$

**Équation 3 Point de déclenchement supérieur.**

$$V_{PDI} = \left( \frac{R_7}{R_6 + R_7} \right) * (-V_{alim}) = \left( \frac{10k}{10k + 1M} \right) * 0 = 0 \text{ volt}$$

**Équation 4 Point de déclenchement inférieur.**

Étant donné que l'alimentation positive du comparateur est 5 volts et que l'alimentation négative est de 0 volt, sa sortie basculera entre 0 et +5 volts. Lorsque la tension d'entrée augmente vers 49,5 millivolts, la sortie du comparateur bascule à +5 volts et lorsqu'elle diminue vers 0 volt, la sortie du comparateur bascule à 0 volt. Ainsi, le comparateur pourra fournir une onde carrée 0 à 5 volts si le signal sinusoïdal à l'entrée est plus grand que 49,5 millivolts pointe. Pour un vent de faible intensité, il est possible que le capteur fournisse un signal minimum de 40 millivolts pointe. C'est pour cette raison qu'un amplificateur est prévu.

Le filtre passe bas passif du premier ordre a une fréquence de coupure ( $f_c$ ) de 132,6 Hz ce qui est suffisant pour laisser passer les vents forts et couper le bruit aux hautes fréquences.

$$f_c = \left( \frac{1}{2 * \pi * R_5 * C_1} \right) = \left( \frac{1}{2 * \pi * 12k\Omega * 0,1\mu F} \right) = 132,6 \text{ Hz}$$

**Équation 5 Fréquence de coupure.**

- W = Unité de la résistance exprimée en ohm.
- F = Unité de la capacité exprimée en Farad

○  $\Pi$  = Symbole PI, 3,1415...

L'amplification du signal sinusoïdal lors des vents faibles est nécessaire pour atteindre le seuil de déclenchement supérieur du comparateur. Ainsi on utilise un amplificateur différentiel avec un gain en tension de 2.

$$V_o = V_{i1} * \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) * \left( \frac{R_4}{R_2} + 1 \right) - V_{i2} * \left( \frac{R_4}{R_2} \right)$$

$$V_o = V_{i1} * \left( \frac{20k\Omega}{10k\Omega + 20k\Omega} \right) * \left( \frac{20k\Omega}{10k\Omega} + 1 \right) - V_{i2} * \left( \frac{20k\Omega}{10k\Omega} \right)$$

$$V_o = V_{i1} * \left( \frac{2}{3} \right) * (3) - V_{i2} * (2)$$

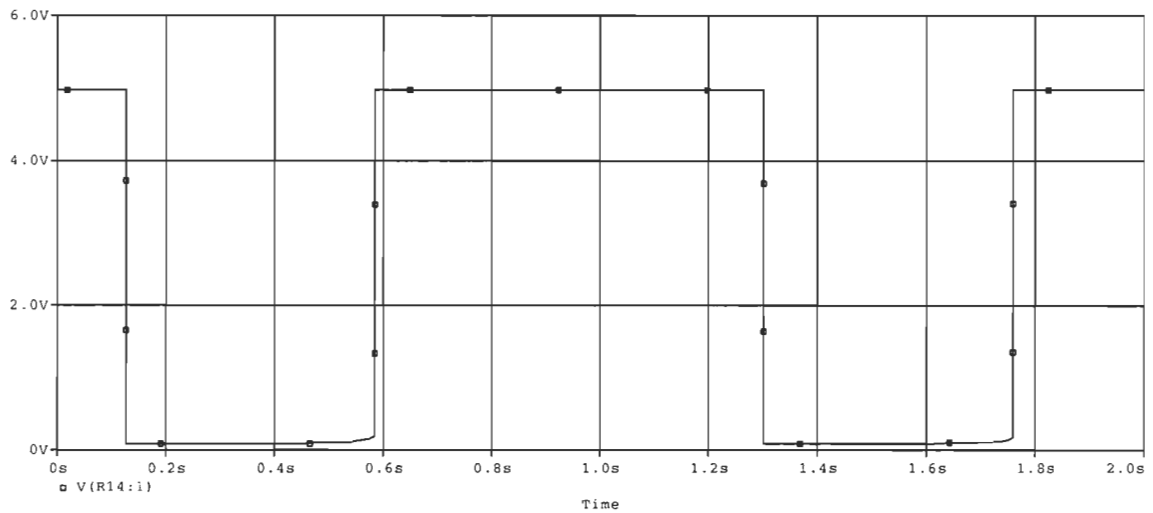
$$V_o = 2 * (V_{i1} - V_{i2})$$

Équation 6 Amplificateur différentielle avec gain de 2.

### 3.1.4 Simulation du conditionneur de signal

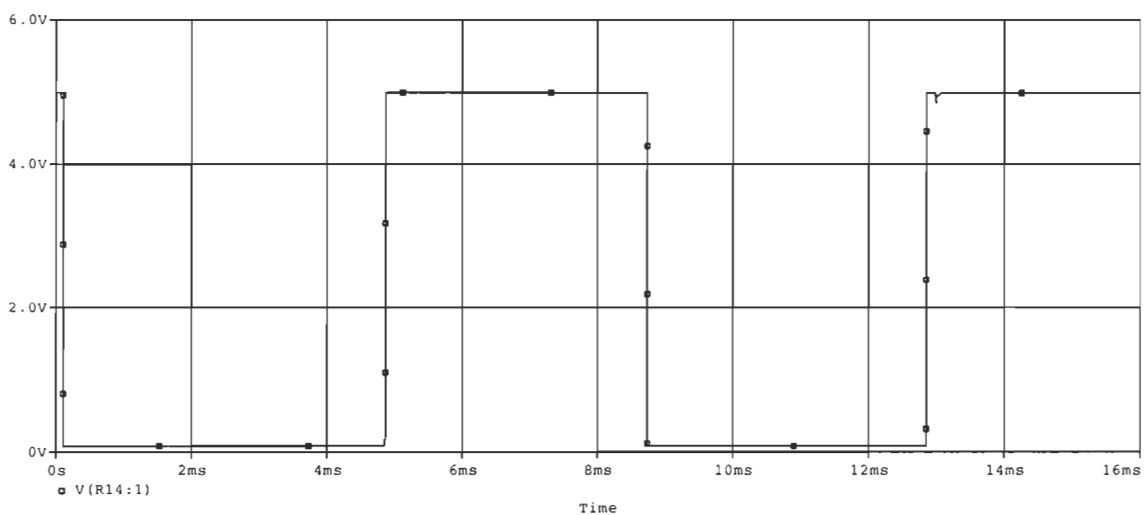
Deux simulations ont été effectuées pour vérifier le comportement du circuit réalisé. La première avec un faible vent d'environ 1m/s et, la seconde pour un vent fort de 96m/s.

Pour un signal à l'entrée de 40 millivolts pointe et de fréquence égale à 0,85 Hz, ce qui correspond à un vent de 1  $m/s$ , nous obtenons une onde carrée variant de 0 volts à 5 volts à une fréquence de 0,85 Hz (figure 22).



**Figure 22 Réponse du circuit de vitesse du vent à un signal 1 m/s**

Pour un signal à l'entrée de 5 volts pointe et de fréquence égale à 125 Hz, ce qui correspond à un vent de  $96 \text{ m/s}$ , nous obtenons une onde carrée variant de 0 volts à 5 volts à une fréquence de 125,85 Hz (figure 23).



**Figure 23 Réponse Circuit Vitesse du vent signal 96 m/s**

### **3.2 Mesure de la direction du vent**

L'information sur la direction du vent dominant est importante pour identifier les emplacements et les orientations idéales des turbines et pour optimiser leur disposition dans un parc éolien. La valeur instantanée de la direction du vent est aussi nécessaire au système de contrôle des grandes éoliennes, afin de les orienter face au vent.

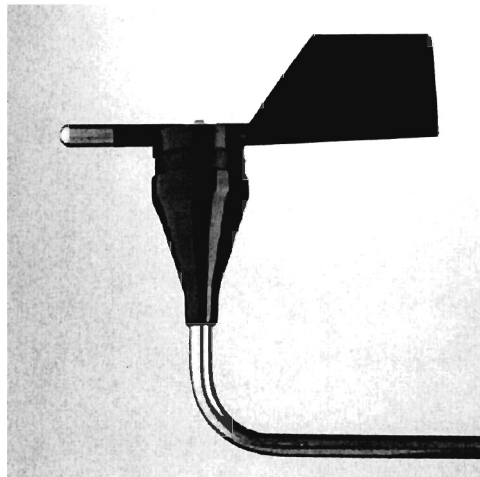
La mesure de la direction du vent est représentée en degrés. On place habituellement la référence zéro degré au nord et l'angle augmente dans le sens horaire.

#### **3.2.1 Échantillonnage des données**

La mesure de la direction du vent doit se faire à toutes les une ou deux secondes et on doit aussi enregistrer la moyenne, l'écart type et la direction de vent lors des rafales. En général, la direction du vent enregistrée est la moyenne des directions mesurées pendant un intervalle de 10 minutes qui est maintenant considérée comme période standard pour la mesure des vents. Ces valeurs moyennes sont utilisées pour représenter la fréquence à laquelle le vent souffle d'une direction donnée sous la forme d'une rose des vents. L'écart type est calculé en utilisant l'échantillon de mesures prises à un intervalle de un ou deux secondes dans chaque intervalle de 10 minutes pour lequel la moyenne est enregistrée. Pour la mesure de la direction des rafales de vent dans une journée, il faut faire coïncider les mesures de la vitesse de vent maximal avec celles de sa direction.

### 3.2.2 Instrumentation

Une girouette ("wind vane") est utilisée pour mesurer la direction de vent. Le modèle le plus utilisé emploie un aileron relié à un axe vertical. L'aileron cherche constamment une position d'équilibre en s'alignant dans le vent (figure 24).



**Figure 24 Girouette de type NRG 200P**

La plupart des girouettes emploient un potentiomètre (résistance variable) qui produit un signal électrique proportionnel à la position de l'aileron. Ce signal électrique est transmis à un conditionneur de signal afin de le rendre utilisable par le système d'acquisition de données. L'orientation de la girouette par rapport à un point de référence connu, habituellement le nord, est importante. Le conditionneur de signal fournit une tension connue aux extrémités du potentiomètre et mesure la tension entre le point milieu du potentiomètre et la référence placée à l'une des extrémités. Le rapport entre ces deux tensions détermine la position de la girouette.

Le potentiomètre ne couvre pas totalement 360 degrés. La plage qui n'est pas couverte est nommée bande morte ("dead band"). Quand le point milieu est dans cette zone, le signal de sortie est aléatoire. Les fabricants compensent la bande morte par logiciel ou par matériel, de manière à ce que l'enregistreur de données empêche les signaux aléatoires. Par conséquent, la bande morte ne devrait pas être alignée dans ou près de la direction de vent dominant.

En choisissant une girouette, on doit utiliser les mêmes critères de sélection que pour l'anémomètre. Il faut prêter une attention particulière à la taille de la bande morte du potentiomètre; celle-ci ne devrait pas excéder 8 degrés. La résolution de la girouette est également importante. Certains manufacturiers divisent 360 degrés, une rotation complète, en 16 segments de 22.5°. Cette résolution peut être inadéquate pour optimiser la disposition des turbines dans un parc éolien.

Un modèle populaire de girouette est le NRG 200P (NRG Systems) en raison de sa conception simple et parce qu'il ne demande aucun entretien. Elle est construite avec des composants d'acier inoxydable et thermoplastique (figure 24) dans laquelle on retrouve un potentiomètre linéaire d'une précision de 1 %, avec une bande morte typique de 4 degrés (figure 25). D'autres modèles offrent de meilleures performances, telle qu'une plus grande sensibilité, mais à un prix beaucoup plus élevé.



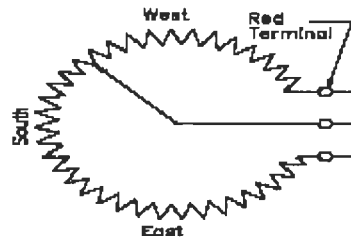
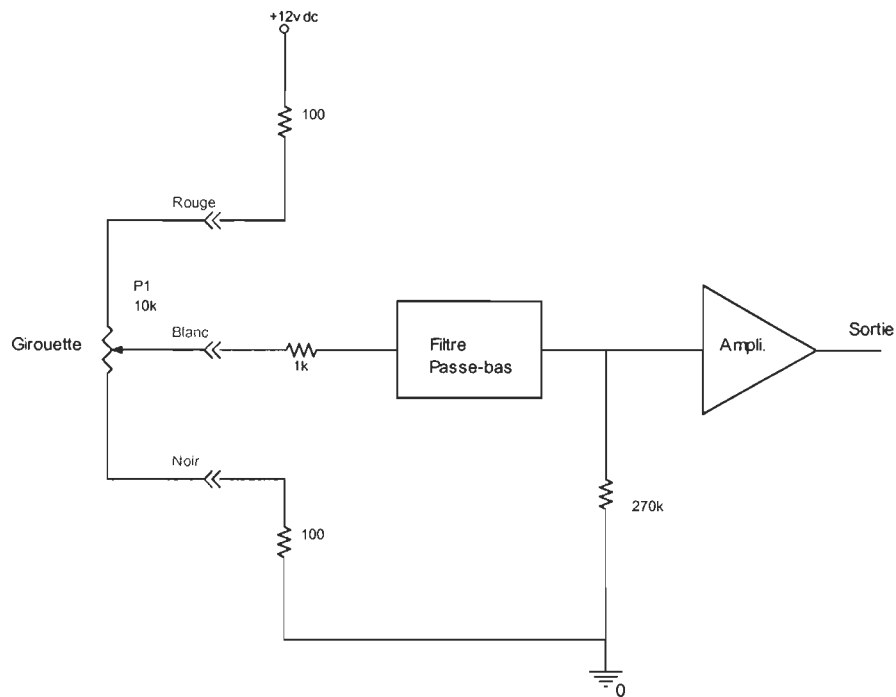


Figure 25 Potentiomètre NRG 200P

### 3.2.3 Conditionneur de signal

Le capteur de direction du vent NRG 200P est un potentiomètre rotatif de  $10\text{ k}\Omega$ . Le signal de sortie est un rapport entre le point milieu et la référence, de la tension appliquée aux bornes du potentiomètre. Le fabricant suggère une interface (figure 26) pour le capteur NRG 200P lorsqu'il n'est pas relié à un système d'acquisitions de données fabriqué par NRG Systems.



**Figure 26 Interface pour la mesure de la direction du vent avec une girouette NRG 200P**

Le potentiomètre étant circulaire, il existe une bande morte entre ses deux extrémités. Cette bande morte est de 8 degrés maximum pour le modèle NRG 200P. En ajoutant une résistance de  $100\ \Omega$  entre le positif de la source d'alimentation à courant continu et le potentiomètre et entre le commun de la source d'alimentation et l'autre extrémité du potentiomètre, la plage de tension produite est légèrement réduite pour compenser la bande morte. Les résistances de  $100\ \Omega$  préviennent aussi des courts-circuits en cas de mauvais branchement.

La résistance de  $1\ k\Omega$  sur le point milieu du potentiomètre prévient les courts-circuits qui pourraient l'endommager. Si le conditionneur de signal possède une résistance

d'entrée supérieure à  $1\text{ k}\Omega$ , elle n'est pas nécessaire. La résistance de  $270\text{ k}\Omega$  est nécessaire pour s'assurer que le signal nous indique le nord lorsque le potentiomètre est dans la bande morte et en circuit ouvert. Une grande valeur de cette résistance n'influencera pas la lecture de la direction du vent.

Le conditionneur de signal (figure 27) doit avoir un filtre passe bas pour rejeter le bruit sur la lecture. Un simple circuit filtre RC (résistance – condensateur) est suffisant puisque le signal est en courant continu. Un amplificateur est aussi nécessaire pour adapter l'impédance de sortie à l'entrée du système d'acquisition de données.

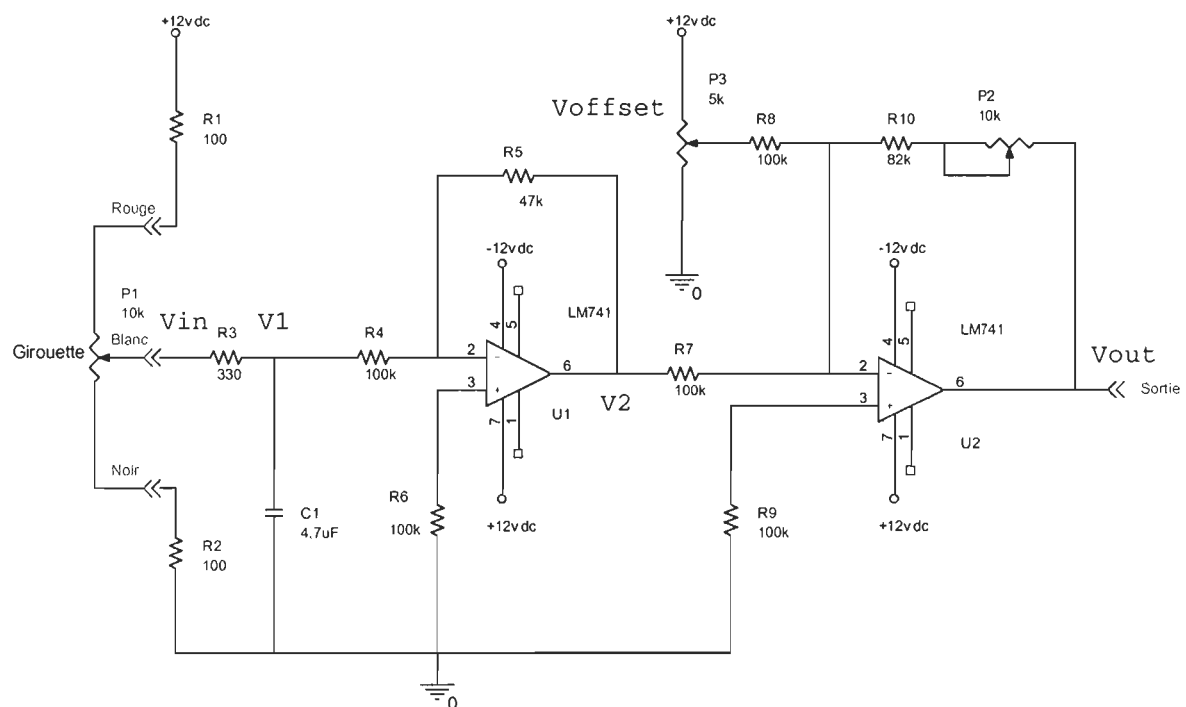


Figure 27 Conditionneur de signal pour la mesure de la direction du vent

Le signal de la girouette ( $V_{in}$ ) varie de 0,118 volt à 11,88 volts en courant continu.

$$V_{\min} = V_{cc} * \left( \frac{R_1}{P_1 + R_1 + R_2} \right) = 12V * \left( \frac{100}{10k + 100 + 100} \right) = 0,118V$$

**Équation 7 Tension minimale du circuit de la girouette.**

$$V_{\max} = V_{cc} * \left( \frac{P_1 + R_1}{P_1 + R_1 + R_2} \right) = 12V * \left( \frac{10k + 100}{10k + 100 + 100} \right) = 11,88V$$

**Équation 8 Tension maximale du circuit de la girouette.**

Le signal de sortie ( $V_{out}$ ) doit varier de 0 à 5 volts en courant continu. D'abord le signal d'entrée est filtré à l'aide d'un filtre passif RC avec une fréquence de coupure d'environ 100 Hz.

$$f_c = \left( \frac{1}{2 * \pi * R_3 * C_1} \right) = \left( \frac{1}{2 * \pi * 330 * 4,7 \mu F} \right) = 102,6 \text{ Hz}$$

**Équation 9 Fréquence de coupure du circuit de la girouette.**

Ensuite, un amplificateur inverseur atténue le signal d'environ -0,47.

$$V_2 = - \left( \frac{R_5}{R_4} \right) * V_1 = - \left( \frac{47k\Omega}{100k\Omega} \right) * V_1 = -0,47 * V_1$$

**Équation 10 Amplificateur inverseur de circuit de la girouette.**

Finalement, nous utilisons un amplificateur sommateur inverseur pour ajuster le gain et le zéro.

$$V_{out} = - \left[ V_2 * \left( \frac{R_{10} + P_2}{R_7} \right) + V_{offset} * \left( \frac{R_{10} + P_2}{R_8} \right) \right]$$

$$V_{out} = - \left[ V_2 * \left( \frac{82k\Omega + 10k\Omega}{100k\Omega} \right) + V_{offset} * \left( \frac{82k\Omega + 10k\Omega}{100k\Omega} \right) \right]$$

$$V_{out} = -0,92[V_2 + V_{offset}]$$

**Équation 11 Amplificateur sommateur de circuit de la girouette.**

### **3.2.4 Simulation du conditionneur de signal**

Les résultats obtenus lors de la simulation du circuit pour des valeurs minimum et maximum du signal à l'entrée sont acceptables. La valeur d'ajustement du zéro (offset) doit être d'environ 55 millivolt et celle du gain de l'amplificateur d'environ -0.92. Ainsi, le potentiomètre P3 doit être ajusté près de la masse et le potentiomètre P2 doit être ajusté à 8,8 kΩ.

Vin (volts)	Vout (volts)
0,118	0,004
11,88	5,003

**Tableau 5 Correspondance tensions d'entrée et de sortie de l'interface pour la mesure de la direction du vent**

### **3.3 Mesure de la température**

La température est un des paramètres fondamentaux en météorologie et en climatologie. Elle varie beaucoup dans le temps, mais aussi dans l'espace, en particulier en fonction de l'altitude et du lieu considéré à la surface de la Terre. La température de l'air est

un descripteur important de l'environnement d'opération d'un parc éolien et est normalement mesurée près du niveau du sol à 1,5 mètres, ou à la hauteur de l'arbre de la turbine. La mesure de la température est utilisée pour calculer la densité de l'air, une variable essentielle à l'estimation de la puissance du vent et celle développée par une turbine. À des températures élevées, on recommande de mesurer aussi l'humidité relative.

### **3.3.1 Échantillonnage des données**

La mesure de la température doit se faire à toutes les une ou deux secondes et on doit enregistrer la moyenne et les températures maximale et minimale dans un intervalle donné. En général, la température enregistrée est la moyenne des températures mesurées pendant un intervalle de 10 minutes. Les valeurs maximum et minimum doivent être déterminées à chaque jour. Ces valeurs sont obtenues par les lectures obtenues à toutes les une ou deux secondes pendant l'intervalle de calcul de la moyenne.

### **3.3.2 Instrumentation**

Typiquement, une sonde de température est composée de trois parties: un capteur, un dispositif d'interface et un bouclier de protection contre les rayonnements ("radiation shield") (figure 28). Le capteur contient un matériel (habituellement du nickel ou du platine) pour lequel il y a une relation entre sa résistance et la température. On recommande l'utilisation des thermistances, des RTD ("resistance thermal detectors") et des semi-conducteurs. Une interface est utilisée pour convertir la variation de la résistance en

fonction de la température en un signal analogique en tension ou en courant. Le capteur est recouvert d'un bouclier pour le protéger des radiations solaires.

La sonde choisie est le CS500 de Campbell Scientific (figures 28 et 29). Le capteur de température a une résistance de  $1000\ \Omega$  et il est fabriqué de platine. Il fournit une tension entre 0 et 1 volt en courant continu pour une mesure de température entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $+60^{\circ}\text{C}$ .

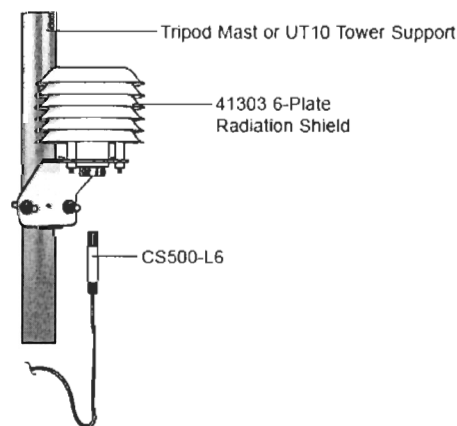


Figure 28 Sonde de température Campbell Scientific CS-500

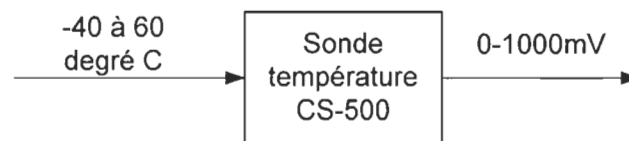


Figure 29 Valeurs d'entrée et de sortie pour la sonde de température CS-500

### 3.3.3 Conditionneur de signal

Le conditionneur de signal doit convertir un signal de 0 à 1000 millivolts correspondant à des températures entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $+60^{\circ}\text{C}$  en un signal analogique de 0 à 5 volts en courant continu pour le système d'acquisition de données (figure 30 et 31).

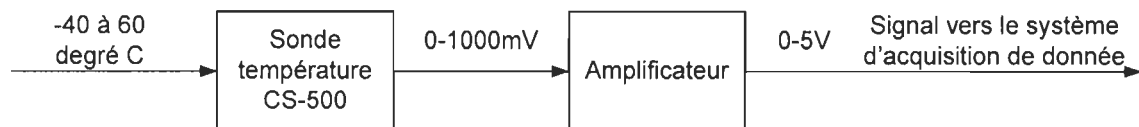


Figure 30 Schéma bloc du conditionneur de signal pour la mesure de la température

Un amplificateur avec une grande impédance d'entrée est utilisé afin d'adapter le signal provenant de la résistance de  $1000\ \Omega$ , en platine, de la sonde. Un ajustement du gain est nécessaire afin d'étalonner correctement la mesure de la température dans la plage de fonctionnement de la sonde.



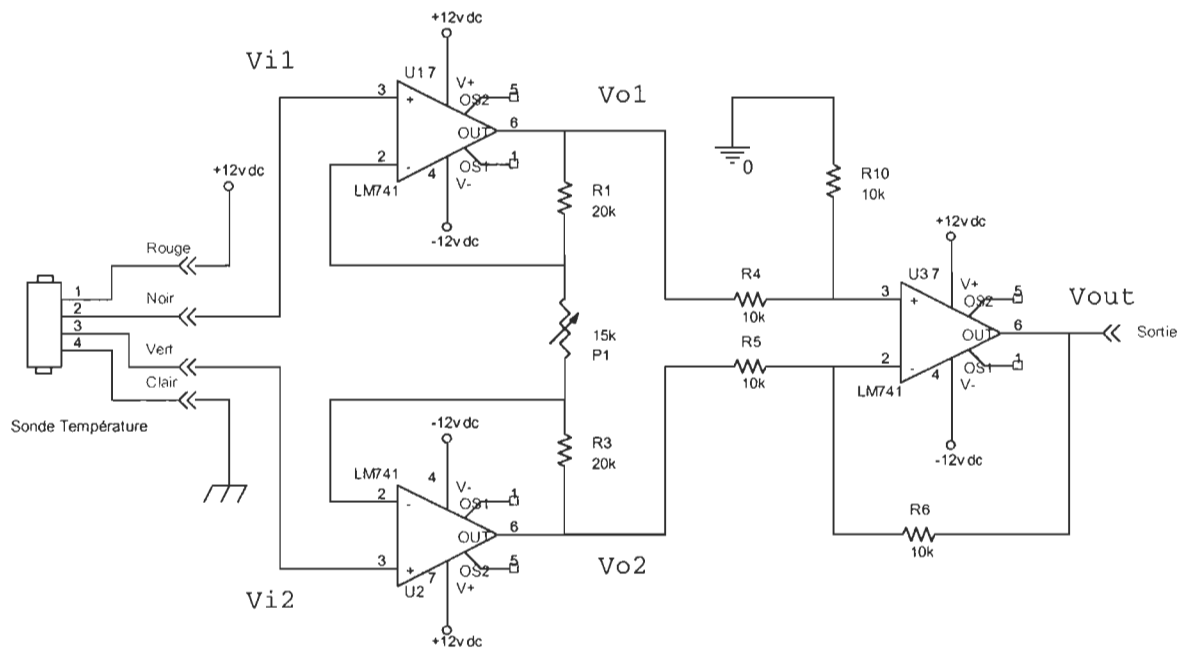


Figure 31 Circuit conditionneur de signal pour la sonde de température.

Le gain de l'amplificateur du signal de température doit être ajusté à 5 à l'aide du potentiomètre P1 afin d'obtenir une variation de 0 à 5 volts pour le système d'acquisition de données. Le potentiomètre P1 doit être ajusté à environ  $10\text{ k}\Omega$  afin d'obtenir un gain de 5.

$$V_o = \left[ V_{o1} * \left( \frac{R_{10}}{R_1 + R_{10}} \right) * \left( \frac{R_6}{R_5} + 1 \right) \right] - \left[ V_{o2} * \left( \frac{R_6}{R_5} \right) \right]$$

$$V_o = [V_{o1} * 0,5 * 2] - [V_{o2} * 1]$$

$$\boxed{V_o = V_{o1} - V_{o2}}$$

$$V_{o1} = \left[ \frac{R_1}{P_1} (V_{i1} - V_{i2}) \right] + V_{i1}$$

$$V_{o2} = \left[ \frac{R_3}{P_1} (V_{i2} - V_{i1}) \right] + V_{i2}$$

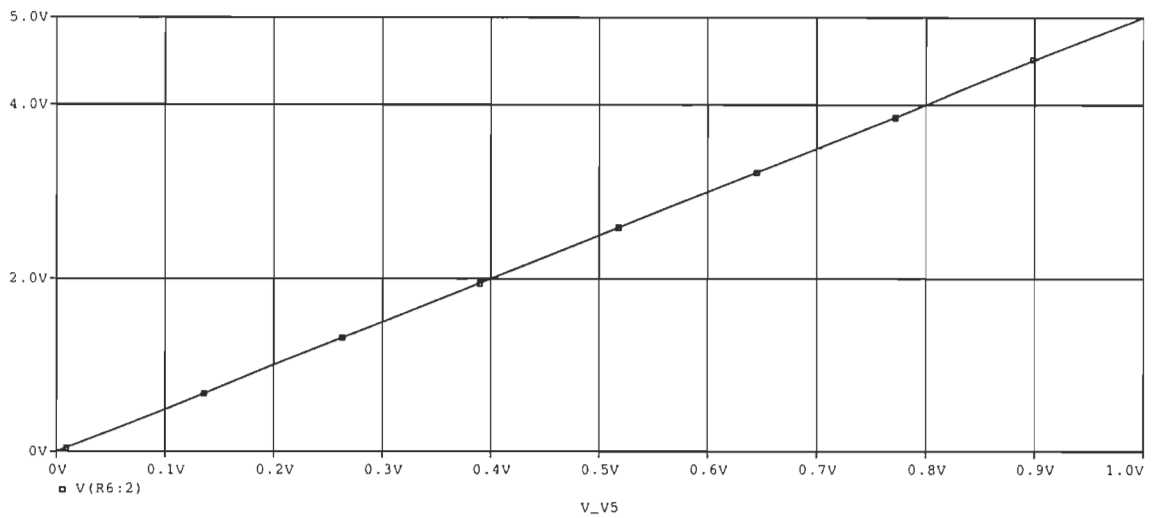
$$V_o = (V_{i1} - V_{i2}) \left[ 1 + \left( \frac{R_1}{P_1} \right) + \left( \frac{R_3}{P_1} \right) \right]$$

$$V_o = (V_{i1} - V_{i2}) \left[ 1 + \left( \frac{2 * 20k\Omega}{P_1} \right) \right]$$

Équation 12 Amplificateur différentielle du circuit de température.

### 3.3.4 Simulation du conditionneur de signal

Les résultats de la simulation du circuit de conditionnement du signal de température sont acceptables. Pour une variation du signal d'entrée de 0 à 1 volts on obtient une sortie qui varie linéairement de 0 à 5 volts à courant continu (figure 32).



**Figure 32 Simulation du fonctionnement du conditionneur du signal de température.**

### **3.4 Mesure des signaux électriques de la turbine**

Pour caractériser les performances d'une éolienne, on mesure la quantité d'énergie électrique qu'elle produit à partir de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette énergie est normalement mesurée en kilowattheures (kWh) ou mégawattheures (MWh) durant un certain laps de temps, une heure ou une année, par exemple. La puissance électrique est normalement mesurée en watts (W), kilowatt (kW), mégawatt (MW), etc. La puissance est le transfert d'énergie par unité de temps. On peut mesurer la puissance à n'importe quel moment, alors que l'énergie se mesure durant un certain laps de temps, par exemple, une seconde, une heure ou une année. Si une éolienne a une puissance nominale de 1000 kW, cela signifie que l'éolienne produira 1000 kWh d'énergie par heure lorsqu'elle atteint sa performance maximale (par vents forts  $> 15$  m/s).

Le système développé pourrait servir à déterminer la courbe de puissance d'une éolienne. Cette courbe de puissance décrit la puissance électrique produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. Le graphe à la figure 33 montre la courbe de puissance de l'éolienne PGI de 35 kW. On élabore les courbes de puissance à partir de mesures de puissance et de vitesse de vent.

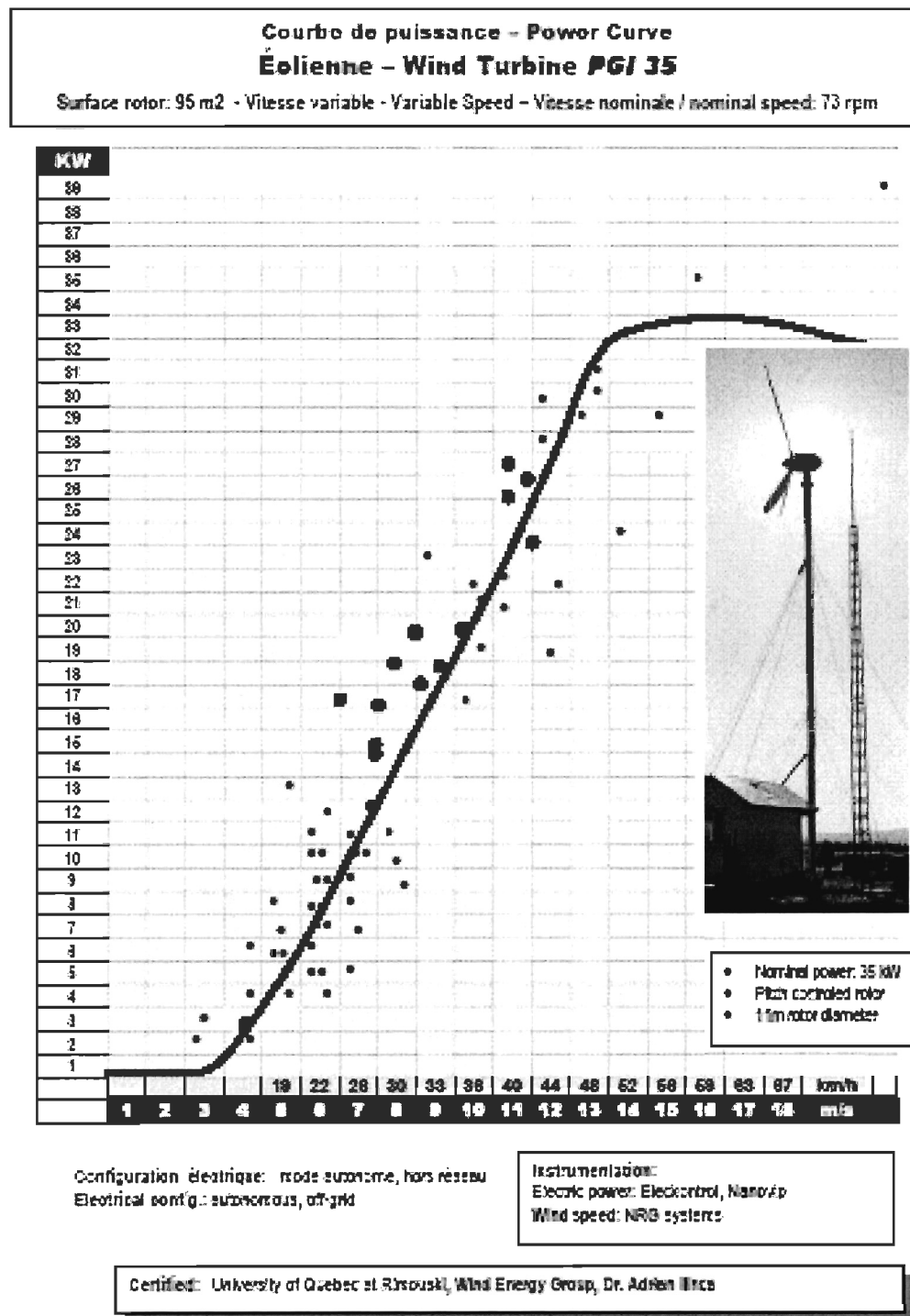


Figure 33 Courbe de puissance de l'éolienne PGI de 35 kW

Dans le cas où les fluctuations de la vitesse de vent ne sont pas trop rapides, il est possible d'utiliser directement les mesures de la vitesse du vent obtenues par l'anémomètre et de lire la puissance de sortie. Si, ensuite, on trace les deux valeurs conjointement, on obtiendra un graphe similaire à celui ci-dessus. Dans la pratique, on doit prendre la moyenne des différentes mesures pour chaque vitesse de vent et les utiliser pour tracer le graphe.

### **3.4.1 Échantillonnage des données**

La mesure de la tension et du courant produits par la génératrice doit se faire à toutes les une ou deux secondes afin de calculer la puissance instantanée. On doit enregistrer la valeur de la puissance moyenne, son écart type et la puissance maximale et minimale sur un intervalle donné. En général, comme pour les autres mesures, la moyenne est calculée sur un intervalle de 10 minutes. Les valeurs moyennes sont aussi utilisées pour établir la courbe de puissance de l'éolienne.

L'énergie totale produite en *kWh* est calculée en utilisant la mesure de la tension et du courant (pour un facteur de puissance près de 1) produits enregistrées dans la base de données. La sommation des produits entre la tension et le courant ( $V \cdot I$ ) se fait pour toutes les valeurs  $N$  enregistrées durant 1 heure.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N V \cdot I}{3600 \cdot 10^3}$$

Équation 13 Calcul de l'énergie totale en kwh.

### 3.4.2 Instrumentation

La mesure de la tension de sortie de la génératrice et de la fréquence se fait par l'intermédiaire de deux transformateurs. La plage de la tension de sortie varie de 0 à 600 volts efficaces et la plage de la fréquence en production est autour de 40 Hz. On abaisse d'abord la tension de sortie avec un transformateur ayant un rapport de transformation de 0,2 (600:120). Ensuite, un second transformateur abaisse la tension par un facteur de 0,1 (12/120). Ainsi, pour une tension de 600 volts efficaces à la sortie de la génératrice, on retrouve à la sortie du premier transformateur une tension de 120 volts efficace (600 \* 0,2) et à la sortie du deuxième transformateur une tension de 12 volts efficaces (120 \* 0,1).

La mesure du courant se fait directement à la sortie de la génératrice par un transformateur de courant 50A. Ce transformateur (figure 34) convertit un courant de 0 à 50 ampères efficaces en un courant de 0-50mA efficaces.



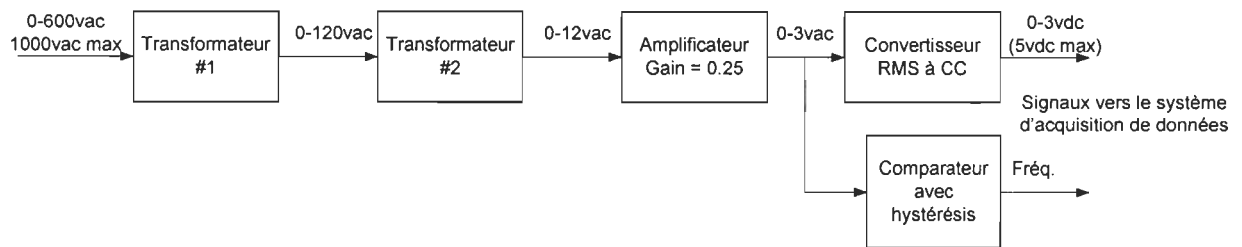
Figure 34 Transformateur de courant.

### 3.4.3 Conditionneur de signal de tension / fréquence

Pour le système d'acquisition de données, il faut convertir le signal variant de 0 à 12 volts efficaces en un signal dans la plage de 0 à 3 volts à courant continu. (Pour une échelle de 0 à 600 volts efficaces sur un maximum de 1000 volts efficaces). D'abord, après l'atténuation des transformateurs de tension, un amplificateur atténue le signal pour le ramener à 3 volts efficaces.

Un circuit convertit le signal efficace (RMS) en un signal équivalent en courant continu. Pour la mesure de la fréquence, le circuit est équivalent à celui utilisé pour mesurer la vitesse du vent (voir la section 3.1.3). Le système d'acquisition de données mesure la fréquence d'une onde carrée variant de 0 à 5 volt.





**Figure 35 Schéma bloc pour la mesure de la tension et de la fréquence**

À la sortie du convertisseur RMS à CC, on obtient une onde sinusoïdale redressée double alternance. La relation entre la tension efficace et la tension maximale est:

$$V_{\max} = \sqrt{2} * V_{\text{eff}} = 1,4142 * V_{\text{eff}}$$

**Équation 14 Conversion d'une tension efficace en une tension maximale.**

La valeur moyenne d'une onde sinusoïdale redressée double alternance par rapport à la tension maximale est:

$$V_{\text{moy}} = 0,636 * V_{\max}$$

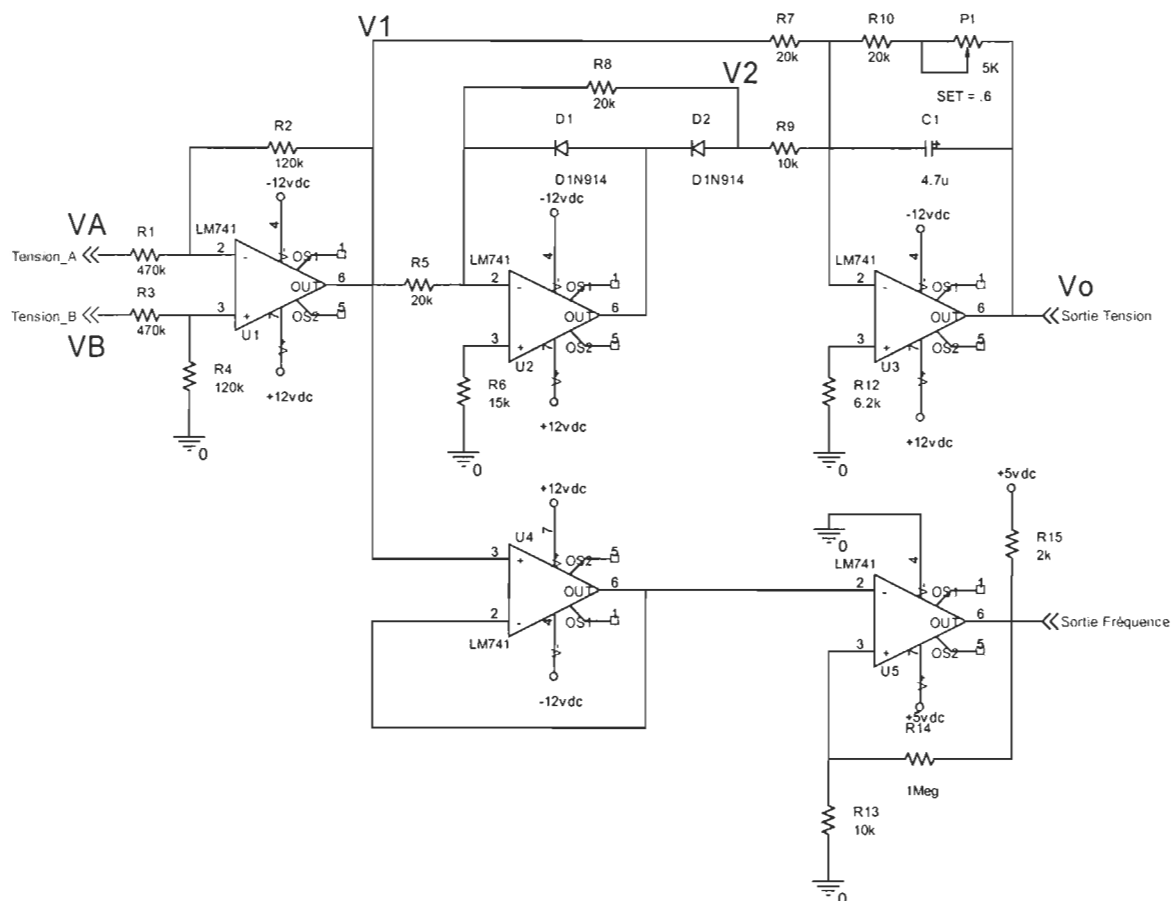
**Équation 15 Calcul de la valeur moyenne d'une onde sinusoïdale.**

Pour obtenir la conversion d'une tension efficace en une tension moyenne (courant continu), il faut ajuster le gain du convertisseur afin de respecter la relation suivante:

$$\frac{V_{\text{moy}}}{V_{\text{eff}}} = 0,636 * \sqrt{2} \approx 1,11$$

**Équation 16 Conversion d'une tension efficace en une valeur moyenne.**

Le schéma électrique du circuit utilisé pour la conversion du signal afin de mesurer la tension et la fréquence est illustré à la figure 36.



**Figure 36 Conditionneur de signal pour la mesure de la tension et de la fréquence**

Le premier étage du circuit est un amplificateur différentiel (U1) dont le gain en tension est d'environ 0,25. Le gain se calcule par:

$$V_1 = V_B * \left[ \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) * \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \right] - V_A * \left[ \frac{R_2}{R_1} \right]$$

$$V_1 = 0,2553 * [V_B - V_A]$$

**Équation 17 Calcul du gain en tension du premier étage du circuit de tension/fréquence.**

Lorsque le signal à l'entrée du convertisseur passe par une alternance positive, la diode D1 est bloquée et la diode D2 conduit. Ainsi, le premier amplificateur (U2) du convertisseur se comporte comme un amplificateur avec un gain unitaire inversé (-1).

$$V_2 = -V_1$$

**Équation 18 Amplificateur inverseur gain unitaire du circuit de tension/fréquence.**

Le deuxième amplificateur (U3) du convertisseur est un circuit sommateur inverseur. Il additionne le signal de l'entrée V1 avec celui de la sortie V2 selon le rapport des résistances. Comme calculé précédemment, il faut ajuster le gain du convertisseur à environ 1,11 et ajuster le potentiomètre P1 à 2,2k  $k\Omega$ . Ainsi, pendant l'alternance positive du signal, la valeur à la sortie est de:

$$V_o = - \left[ \left( \frac{P_1 + R_{10}}{R_7} \right) * V_1 + \left( \frac{P_1 + R_{10}}{R_9} \right) * V_2 \right]$$

$$V_o = \left[ \left( \frac{2,2k + 20k}{10k} \right) * V_1 - \left( \frac{2,2k + 20k}{20k} \right) * V_1 \right]$$

$$V_o = \left[ \left( \frac{22,2k}{10k} \right) * V_1 - \left( \frac{22,2k}{20k} \right) * V_1 \right]$$

$$V_o = [2,22 * V_1 - 1,11 * V_1] = 1,11 * V_1$$

**Équation 19 Amplificateur sommateur inverseur (alternance positive) du circuit de tension/fréquence.**

Lorsque le signal à l'entrée passe par une alternance négative, la diode D1 conduit et la diode D2 est bloquée. Donc, l'entrée du deuxième amplificateur (U2) est mise à la masse virtuelle. Le troisième amplificateur (U3) additionne seulement le signal provenant de l'entrée V1 selon le rapport des résistances. Pendant l'alternance négative, le signal à la sortie est de:

$$V_o = - \left( \frac{P_1 + R_{10}}{R_7} \right) * V_1$$

$$V_o = - \left( \frac{P_1 + 20k}{20k} \right) * V_1$$

$$V_o = - \left( \frac{22,2k}{20k} \right) * V_1 = -1,11 * V_1$$

**Équation 20 Amplificateur sommateur inverseur (alternance négative) du circuit de tension/fréquence.**

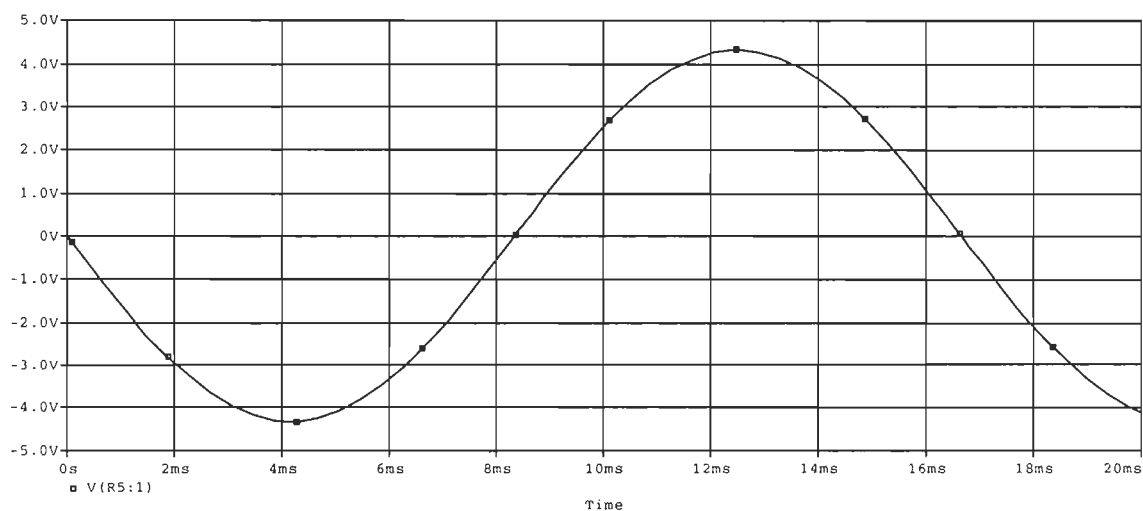
À la sortie, le signal d'entrée d'alternance négative est inversé par l'amplificateur. Ainsi, nous obtenons bien un signal sinusoïdal redressé double alternance amplifié à 1,11 pendant l'alternance positive et amplifié à - 1,11 pendant l'alternance négative.

Pour une tension de 600 volts efficaces produits par la génératrice, on obtient après les deux transformateurs une tension efficace de 12 volts. Le premier amplificateur atténue ce signal à 3 volts efficace qui correspond à une tension maximale de 4,24 volts. Le convertisseur RMS à CC va amplifier ce signal à environ 4,71 volts ( $1,11 * 4,24$  volts). La valeur moyenne à la sortie du convertisseur est d'environ 3 volts à courant continu ( $0,636 * 4,71$ ).

#### **3.4.4 Simulation du conditionneur de signal**

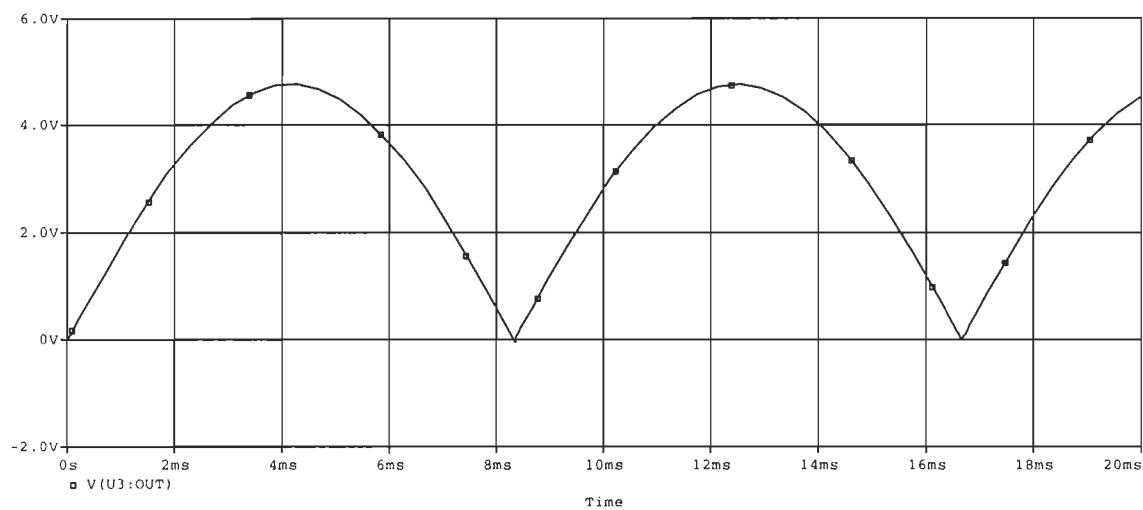
Pour un signal à l'entrée du conditionneur de 12 volts efficace ou 16,97 volts maximale, on obtient à la sortie du conditionneur une onde sinusoïdale redressée à double alternance.

Le signal obtenu à la sortie de l'amplificateur différentiel (figure 37) est d'environ 4,33 volts maximal (ou environ 3 volts efficaces). Ceci s'explique par le rapport des résistances qui donne une amplification de 0,255 en théorie.



**Figure 37 Simulation du conditionneur du signal de tension.**

Le convertisseur RMS à CC doit amplifier ce signal de 1,11. On obtient une onde sinusoïdale redressée à double alternance d'amplitude maximale d'environ 4,8 volts maximale (figure 38). La valeur moyenne de cette onde est de 3 volts ( $0,636 * 4,8$  volts).



**Figure 38 Simulation du conditionneur du signal de tension.**

En ajoutant le condensateur C1 pour filtrer le signal, on obtient à la sortie une valeur moyenne de 3 volts. Le condensateur C1 de 4.7  $\mu\text{F}$  est choisit de façon à filtrer les fréquences au dessus de 0,5 Hz.

### 3.4.5 Conditionneur de signal de courant

Pour le système d'acquisition de données, il faut convertir le signal variant de 0 à 50 ampères efficace en un signal de 0 à 5 volts à courant continu (figure 39). Une résistance de 50  $\Omega$  permet d'obtenir une tension de 0 à 2.5 volts efficaces à l'entrée de l'amplificateur. Comme pour le conditionneur du signal de tension, un circuit convertit le signal efficace afin d'obtenir 0-5 volts en courant continu (figure 40).

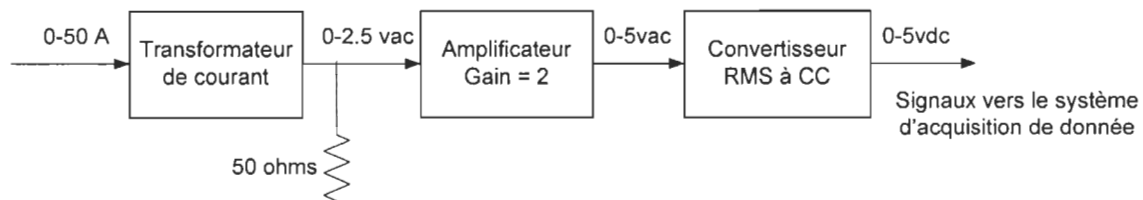


Figure 39 Schéma bloc pour la mesure du courant.

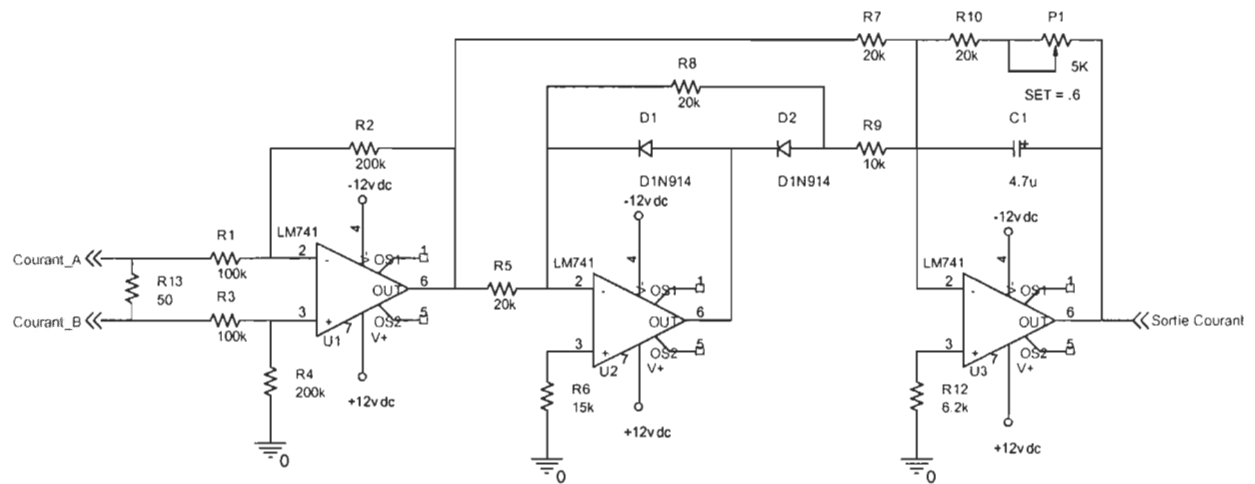


Figure 40 Conditionneur pour la mesure du signal de courant

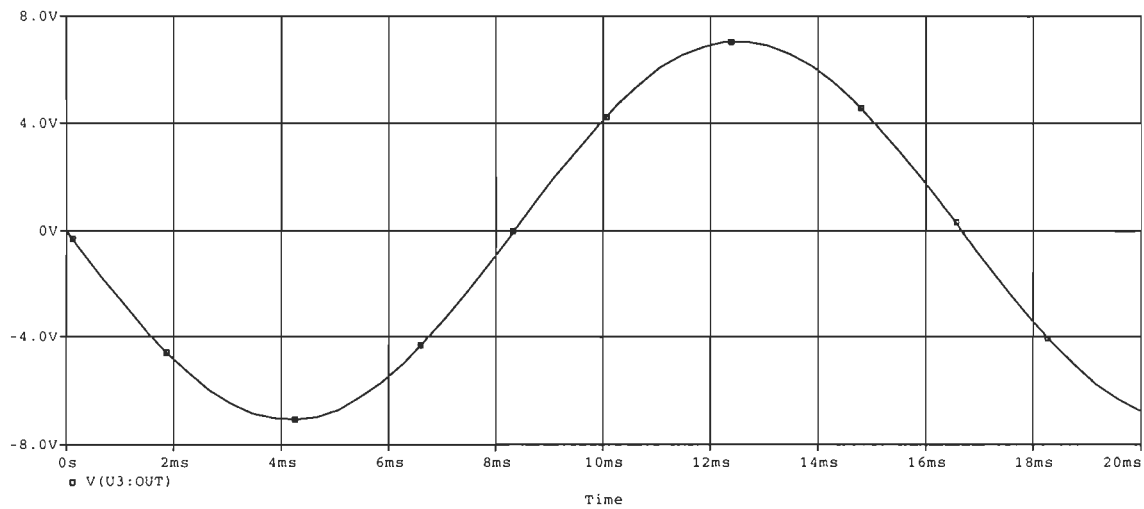
Le signal d'entrée variant de 0 à 2,5 volts efficaces est amplifié par un facteur de 2 par U1 afin d'obtenir un signal variant de 0 à 5 volts efficaces à l'entrée du convertisseur RMS à tension continue. Le convertisseur utilisé est le même que pour le circuit conditionneur du signal de tension décrit précédemment.

### 3.4.6 Simulation du conditionneur de signal

Pour un signal à l'entrée du conditionneur de 2,5 volts efficace ou 3,54 volts maximale, on obtient à la sortie du conditionneur une onde sinusoïdale redressée à double alternance.

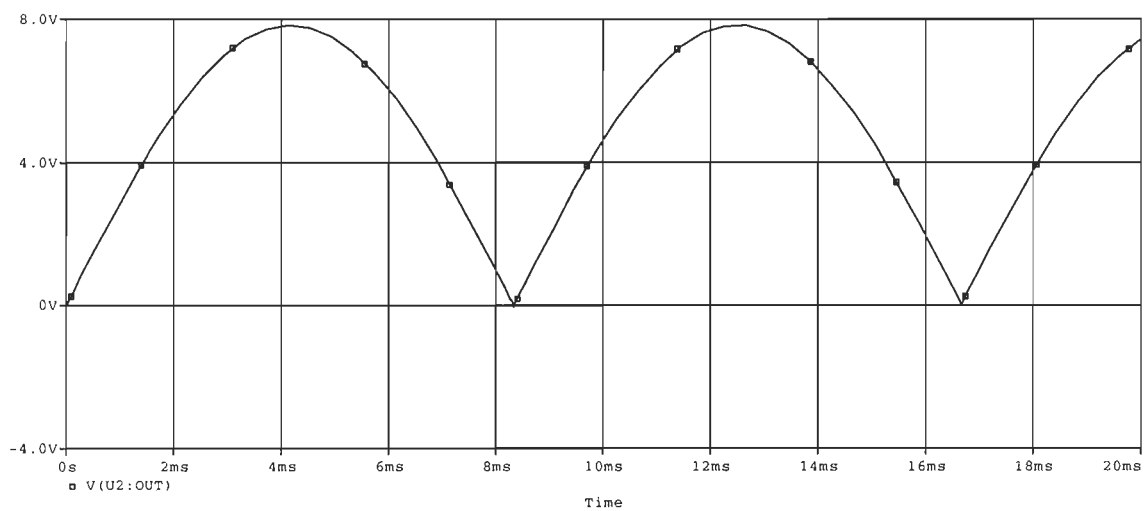
Le signal obtenu à la sortie (figure 41) de l'amplificateur différentiel (U1) est d'environ 7,04 volts maximal (ou environ 5 volts efficaces).





**Figure 41 Simulation du conditionneur du signal de courant.**

Le convertisseur RMS à CC doit amplifier ce signal de 1,11. On obtient une onde sinusoïdale redressée à double alternance d'amplitude maximale d'environ 8,28 volts (figure 42). La valeur moyenne de cette onde est de 5 volts ( $0,636 * 7,83$  volts).



**Figure 42 Simulation du conditionneur du signal de courant.**

En ajoutant le condensateur C1 pour filtrer le signal, on obtient à la sortie une valeur moyenne de 5 volts. Le condensateur C1 de 4.7 uF est choisi de façon à filtrer les fréquences au dessus de 0,5 Hz.

### **3.5 Caméra IP**

Une caméra IP est utilisée pour transmettre les images de l'éolienne par le réseau Internet. Elle utilise un protocole de communication qui permet un accès sécuritaire à la caméra et le transfert des images.

#### **3.5.1 Protocole de transfert d'image**

La caméra est munie d'un serveur dont le rôle est de fournir les images aux clients. Une procédure se déroule constamment afin que les images soient transmises. D'abord, le serveur de transfert d'image ouvre le port TCP/IP (8020) et attend la connexion et l'authentification d'un client. Ensuite, sur une demande d'image du client, le serveur d'image envoie une image au client. Ces échanges sont illustrés à la figure 43.

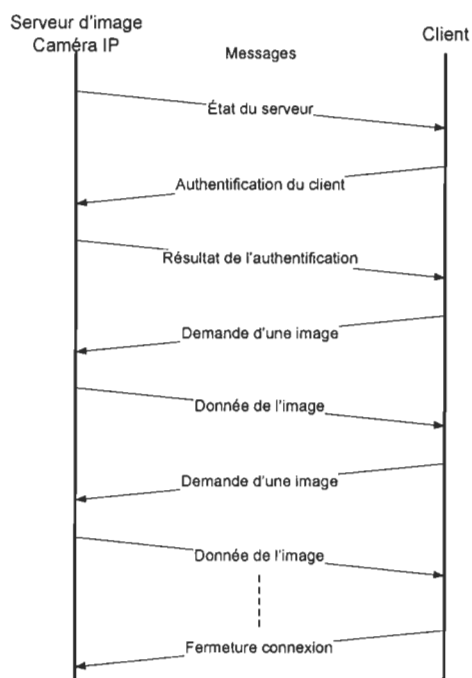


Figure 43 Transfert de paquets entre la caméra et un client.

### 3.5.2 Message état du serveur

Ce message de 4 octets est envoyé par le serveur d'image lorsqu'un client se connecte. Il indique si le serveur a atteint le nombre maximum de connexions. Le nombre maximum de clients varie de 8 à 32 selon la configuration de la caméra. Si le nombre actuel de clients connectés est inférieur au maximum, le serveur envoie 'SERVER\_NOT\_FULL(121)'. Si le nombre de clients connectés est égal au maximum, le serveur envoie 'SERVER\_FULL(120)'. Si le client reçoit un 'SERVER\_NOT\_FULL(121)', il peut envoyer un message de demande d'image au serveur. Sinon, le client doit se déconnecter.

(1) Message d'état du serveur: SERVER\_NOT\_FULL

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'1'	'2'	'1'

(2) Message d'état du serveur: SERVER\_FULL

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'1'	'2'	'0'

### 3.5.3 Authentification du client

Lors de l'authentification, le client envoie un message au serveur avec un nom d'utilisateur et un mot de passe. La longueur du message est de 48 octets (3 mots de 16 octets) ('IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_PKT\_LEN(48)').

Byte index	0	4	8	12
0	IMG_XFER_USER_AUTH	Reserved		
16	USER_ID			
32	USER_PASSWD			

(1) IMG\_XFER\_USER\_AUTH: Ce champ est de 4 octets et contient les codes ASCII '0300' (user auth message id)

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'3'	'0'	'0'

(2) USER\_ID: Ce champ est de 16 octets et contient le nom de l'utilisateur. Il débute à l'octet #16 ('IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_ID\_OFFSET(16)') et il se termine par un caractère nul.

(3) USER\_PASSWD: Ce champ est de 16 octets et contient le mot de passe. Il débute à l'octet #32 ('IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_PASSWD\_OFFSET(32)') et il se termine par un caractère nul.

### 3.5.4 Résultat de l'authentification

Le serveur envoie une réponse sur l'authentification. Ce message est de 4 octets ('IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_RSLT\_PKT\_LEN(4)').

(1) Lorsque l'authentification est un succès, un champ de 4 octets est reçu du serveur et contient les codes ASCII '0301'(IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_SUCCESS).

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'3'	'0'	'1'

(2) Lorsque l'authentification a échoué un champ de 4 octets est reçu du serveur et contient les codes ASCII '0302'(IMG\_XFER\_USER\_AUTH\_FAIL).

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'3'	'0'	'2'

(3) Lorsque l'entête du message que le client a envoyé lors de l'authentification est erroné, le serveur envoie un champ de 4 octets qui contient les codes ASCII '9000'(INVALID\_MSG\_ID).

### 3.5.5 Transfert d'image

Lorsque le client fait une demande d'image au serveur, il envoie un message de 4 octets ('0110'). Le serveur reçoit le message et envoie une image.

Byte index	0	1	2	3
Contents	'0'	'1'	'1'	'0'

L'image reçue par le client a le format suivant:

Byte index	0	1	2	3
0	'I'	'M'	'G'	' '
4	'H'	'D'	'R'	Reserved
8	Reserved			
12				

16				
20	'0'	'1'	'3'	'0'
24	IMG_SIZE[0]	IMG_SIZE[1]	IMG_SIZE[2]	IMG_SIZE[3]
28	IMG_SIZE[4]	IMG_SIZE[5]	IMG_SIZE[6]	IMG_SIZE[7]
32	Jpeg Image Data			
36				
40				
...				

- L'entête de l'image débute avec la chaîne de caractères: 'IMG\_HDR'.
- Les octets de 20 à 23 contient la chaîne de caractères '0130'(IMAGE\_OK).
- Les champs IMG\_SIZE contient la longueur en octets de l'image en format jpeg. Par exemple si l'image est de 5123 octets le contenu des octets 24 à 31:

IMG\_SIZE[0] = '0', IMG\_SIZE[1] = '0', IMG\_SIZE[2] = '0', IMG\_SIZE[3] = '0'  
 IMG\_SIZE[4] = '5', IMG\_SIZE[5] = '1', IMG\_SIZE[6] = '2', IMG\_SIZE[7] = '3'

L'image au format jpeg débute avec 0xffd8 et se termine avec 0xffd9.

### 3.5.6 Algorithme de réception d'une image

L'algorithme du programme de réception d'une image de la caméra est présenté à la figure 44.

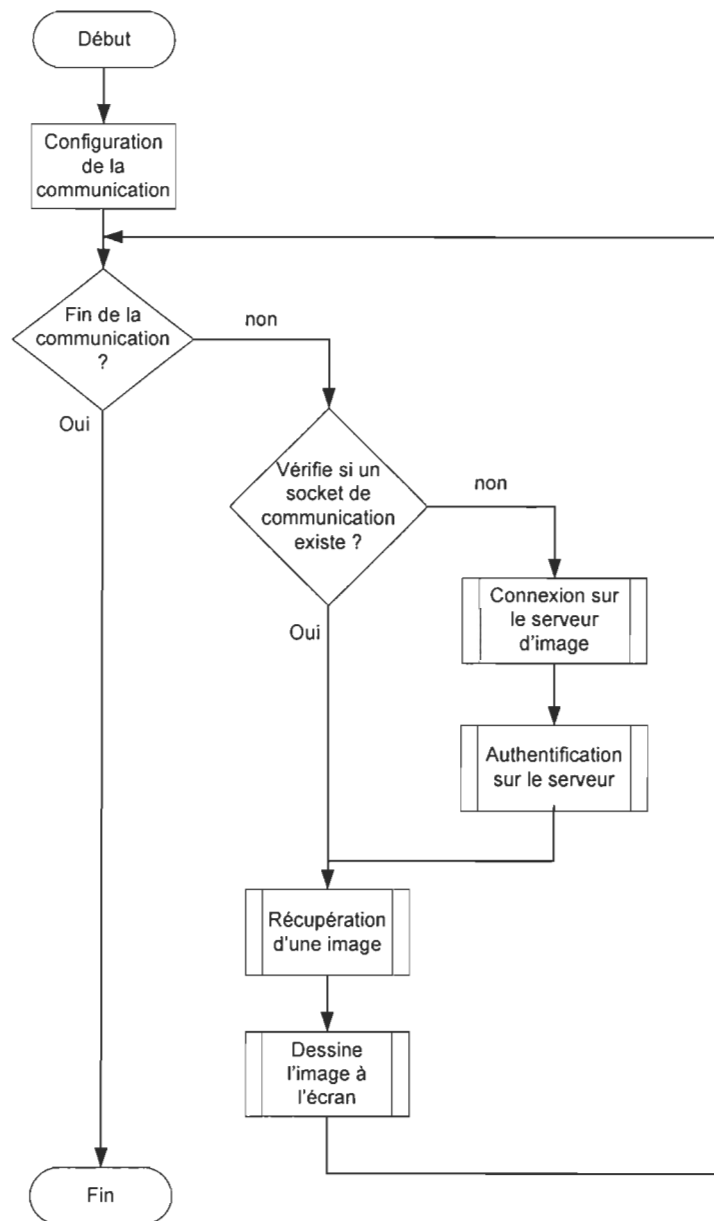


Figure 44 Algorithme de réception d'une image de la caméra.

## CHAPITRE 4

### SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES

### ET DE COMMUNICATION

#### 4.1 Introduction

Les signaux reçus de la carte de conditionnement des signaux des capteurs, présentées au chapitre précédent, sont traités par une carte de développement basée sur le microcontrôleur H8S-2633 de la compagnie Renesas (figure 45). Un port de communication série du microcontrôleur est raccordé à un module de communication Internet embarquée. La carte microcontrôleur fait la lecture des variables, effectue le traitement, la mise à l'échelle, la conversion en code ASCII et le transfert des variables par le port série vers le module Internet embarqué. Dans le module Internet, les variables sont sauvegardées en mémoire et une page html est construite pour les rendre accessibles.



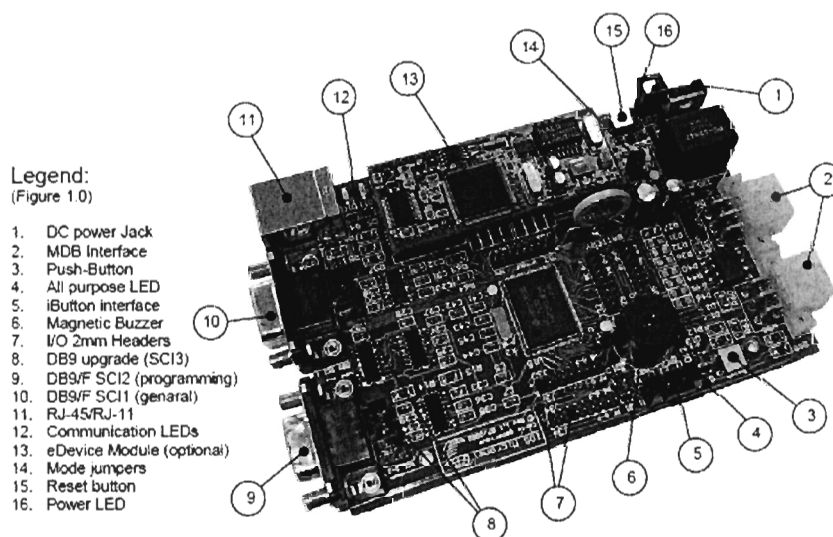
**Figure 45 Schéma bloc du système d'acquisition de données et de communication.**



## 4.2 Microcontrôleur

La carte de développement construite autour du microcontrôleur H8S 2633 possède les caractéristiques suivantes (figure 46):

- Microprocesseur H8S 2633 de 25 Méga Hertz,
- Mémoire flash EPROM de 256 kilos octets,
- Mémoire RAM de 16 kilos octets,
- 56 entrées / sorties discrètes,
- 12 convertisseurs analogiques à numériques,
- 4 convertisseurs numériques à analogiques,
- 3 ports séries,
- 6 temporisateurs 16 bites et 8 temporisateurs 8 bits.



**Figure 46** Carte microcontrôleur H8S2633.

Le système d'acquisition de données doit faire la lecture de quatre signaux analogiques: la tension, le courant, la direction du vent et la température. Pour les signaux de la vitesse du vent et de la fréquence de la tension, le système d'acquisition doit lire la fréquence du signal. Finalement, la lecture de quatre signaux discrets permet de lire l'état de l'éolienne. Tous les signaux provenant des conditionneurs sont raccordés à la carte microcontrôleur selon le tableau 6.

Description du capteur	Signaux d'entrée sur la carte interface	Signaux de sorties sur la carte interface	Entrées du microcontrôleur
Tension instantanée (Automate)	0 à 12 VAC rms	0 à 5VDC	AN4 (J48)
Courant instantanée (Automate)	0 à 2.5 VAC	0 à 5VDC	AN5 (J48)
Température extérieure (Sonde température)	0 à 1.0 VDC	0 à 5VDC	AN6 (J48)
Direction du vent (Girouette)	0 à 12 VDC	0 à 5VDC	AN7 (J48)
Bit d'état #1 (Automate)	0-24 VDC	0-5VDC	PF0 (J49)
Bit d'état #2 (Automate)	0-24 VDC	0-5VDC	PF1 (J49)
Bit d'état #3 (Automate)	0-24 VDC	0-5VDC	PF2 (J49)
Bit d'état #4 (Automate)	0-24 VDC	0-5VDC	PF3 (J49)
Vitesse du vent (Anémomètre)	0-6 VAC	Onde carrée (0-5V)	PB0 (J42)
Vitesse du rotor (néglige glissement)(Automate)	0-12VAC rms	Onde carrée (0-5V)	PB1 (J42)

**Tableau 6 Signaux mesurés par le système d'acquisition de données.**

### 4.3 Internet embarqué

La connectivité Internet permet de raccorder un système électronique ou système embarqué au réseau Internet. On parle aussi de connectivité IP (Internet Protocol). Un système embarqué est un appareil spécialisé autonome utilisant un microprocesseur pour exécuter des tâches spécifiques. Il n'est pas conçu pour être programmé par l'utilisateur et

ne possède pas les entrées / sorties standards comme un clavier ou un écran. Ajouter une connectivité IP à un système embarqué permet de le contrôler à distance par une application réseau ou plus simplement par le "Web", en utilisant un navigateur Internet (Netscape, Internet Explorer...). La connectivité IP demande de monter une suite de protocoles Internet sur le système électronique. On parle alors de protocoles Internet embarqués ou plus simplement d'Internet embarqué. La suite des protocoles IP à embarquer est plus ou moins importante en fonction des services à implanter: contrôle par une application réseau spécifique (socket), contrôle par le web (HTTP), envoi d'emails (smtp).

La connectivité IP permet de contrôler un équipement électronique de n'importe où dans le monde. Cet équipement peut à son tour prévenir un opérateur ou le tenir informer de l'état du système. La connectivité IP permet l'utilisation d'interfaces graphiques modernes, tel qu'un applet Java exécutée par un navigateur web qui interroge un serveur web embarqué.

La connectivité IP met en oeuvre différents protocoles Internet. Internet est un réseau de transmission de données et est basé sur les protocoles TCP/IP. Les protocoles TCP/IP sont indépendants du support de transmission ou médium choisi: Ethernet, liaison série (pour accès à Internet par le Réseau Téléphonique Commuté), liaison radio par téléphone cellulaire GSM, courant porteur. Cette indépendance par rapport au médium en fait son intérêt et son universalité. On peut interconnecter des réseaux hétérogènes par Internet.

#### **4.4 Technologie SmartStack**

La technologie SmartStack de la compagnie eDevice intègre une solution logicielle qui permet de connecter des équipements à Internet afin de transmettre ou de recevoir des données ou des courriels ou être contrôlés à distance. La technologie SmartStack consiste à incorporer sur un seul et unique DSP (processeur de traitement de signal) à la fois une couche physique (modem réseau commuté, MAC Ethernet, GSM), les protocoles TCP/IP nécessaires pour effectuer des transactions sur le réseau ainsi qu'une couche application client.

Le module eDmod 200 permet de relier un système embarqué à Internet par l'intermédiaire d'un réseau local (LAN Ethernet). C'est une solution peu coûteuse et appropriée pour les systèmes qui doivent être en ligne sans interruption. À l'aide du serveur HTTP embarqué, on peut administrer et contrôler tout équipement depuis un navigateur Internet standard (Internet Explorer, Netscape, Mozilla ...). La procédure est simple, l'utilisateur peut créer un site web spécifique au système puis le consulter afin de récupérer les données à tout instant et ce depuis n'importe quel micro-ordinateur connecté à Internet.

Le serveur HTTP contient la page Web conçue qui est accessible par le programme de collection des données (décrite au chapitre 5) ou par un navigateur Internet. Les variables transmises par le port série du microcontrôleur mettent à jour les variables du tableau 7.

Variables	Description
userInteger[1]	Tension
userInteger[2]	Courant
userInteger[3]	Fréquence
userInteger[4]	Vitesse du vent
userInteger[5]	Température
userInteger[6]	Direction du vent
userInteger[7]	Bit d'état #1
userInteger[8]	Bit d'état #2
userInteger[9]	Bit d'état #3
userInteger[10]	Bit d'état #4

**Tableau 7 Variables du serveur HTTP embarqué**

La page web est codée en utilisant les balises du langage XML. Lorsqu'un client demande la page web data.html (tableau 8), le serveur HTTP remplace les balises correspondantes aux variables (<%ed\_UserInteger[1]%>) par leurs valeurs numériques mises à jour par le microcontrôleur.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<racine>
  <eole>
    <tension><%ed_UserInteger[1]%></tension>
    <courant><%ed_UserInteger[2]%></courant>
    <freq><%ed_UserInteger[3]%></freq>
    <vVent><%ed_UserInteger[4]%></vVent>
    <temp><%ed_UserInteger[5]%></temp>
    <dVent><%ed_UserInteger[6]%></dVent>
    <b0><%ed_UserInteger[7]%></b0>
    <b1><%ed_UserInteger[8]%></b1>
    <b2><%ed_UserInteger[9]%></b2>
    <b3><%ed_UserInteger[10]%></b3>
  </eole>
</racine>
```

**Tableau 8 Serveur HTTP embarqué: data.html**

Il faut utiliser la procédure indiquée dans la note d'application du manufacturier afin d'intégrer cette page (tableau 8) dans le serveur HTTP.

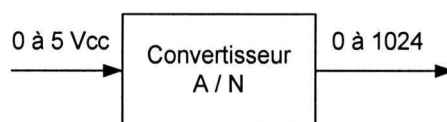
#### 4.5 Conversion des mesures analogiques

Le microcontrôleur reçoit un signal variant de 0 à 5 volts à courant continu sur les entrées analogiques AN4 à AN7 (tableau 9). Ces signaux sont proportionnels à la grandeur physique mesurée telle que spécifiée dans le chapitre précédent. Le microcontrôleur va lire ces variables à un intervalle régulier d'environ une seconde.

Description du capteur	Signaux de sorties sur la carte interface	Entrées du microcontrôleur
Tension instantanée (Automate)	0 à 5VDC	AN4 (J48)
Courant instantanée (Automate)	0 à 5VDC	AN5 (J48)
Température extérieure (Sonde température)	0 à 5VDC	AN6 (J48)
Direction du vent (Girouette)	0 à 5VDC	AN7 (J48)

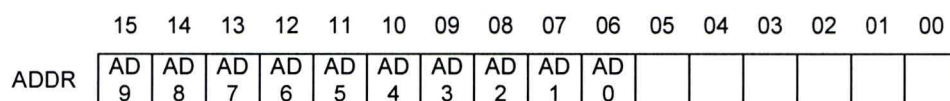
**Tableau 9 Signaux de la carte d'interface**

Les convertisseurs analogiques numériques du microcontrôleur ont une résolution de 10 bits. Pour un signal analogique variant de 0 à 5 Vcc une valeur numérique de 0 à 1023 sera produite (figure 47).



**Figure 47 Convertisseur A / N**

Les convertisseurs sont configurés pour convertir seulement un canal à la fois ("single mode"). Les canaux à convertir correspondent aux entrées AN4 à AN7. Les valeurs converties de chaque canal sont disponibles dans les registres ADDRA à ADDRD. L'algorithme de la séquence de conversion d'une entrée analogique en variable numérique est élaboré dans la prochaine section. Les registres ADDR contiennent 16 bits mais la valeur de l'entrée analogique convertie occupe les 10 bits les plus significatifs du registre (figure 48). Il faut en tenir compte dans le programme de conversion.



**Figure 48 Convertisseur A / N Registre ADDR**

Après la conversion d'une entrée en valeur numérique, il faut faire un décalage de six bits vers la droite et faire la mise à l'échelle de la variable. Par la suite, on convertit la valeur mise à l'échelle en une chaîne de caractères en code ASCII prête à être transférée dans les variables du serveur HTTP embarqué.

Pour faire la conversion de la valeur numérique de 0 à 1023 en une tension de 0 à 1000 volts RMS nous utilisons:

$$tension(V) = (AD.ADDRA \gg 6) * \left( \frac{1000 V_{RMS}}{1024} \right)$$

**Équation 21 Conversion valeur numérique en une tension RMS.**

Pour la conversion de la valeur numérique de 0 à 1024 en un courant de 0 à 50 ampères RMS nous utilisons:

$$courant(A) = (AD.ADDRB \gg 6) * \left( \frac{50A}{1024} \right)$$

**Équation 22 Conversion valeur numérique en une courant RMS**

Pour la conversion de la valeur numérique de 0 à 1023 en une température de -40°C à +60°C nous utilisons:

$$température(^{\circ}C) = \left( (AD.ADDRC \gg 6) * \left( \frac{60^{\circ}C + 40^{\circ}C}{1024} \right) \right) - 40^{\circ}C$$

**Équation 23 Conversion valeur numérique en une température en Celsius.**

Pour la conversion de la valeur numérique de 0 à 1023 en une direction du vent de 0 à 360° nous utilisons:

$$angle(^{\circ}) = (AD.ADDRD \gg 6) * \left( \frac{360^{\circ}}{1024} \right)$$

**Équation 24 Conversion valeur numérique en un angle de 0 à 360 degré.**



#### 4.5.1 Algorithmes des programmes pour la conversion des mesures analogiques

Les figures 49 à 52 illustrent les algorithmes des programmes de mesure de la tension, du courant, de la température et de la direction du vent respectivement.

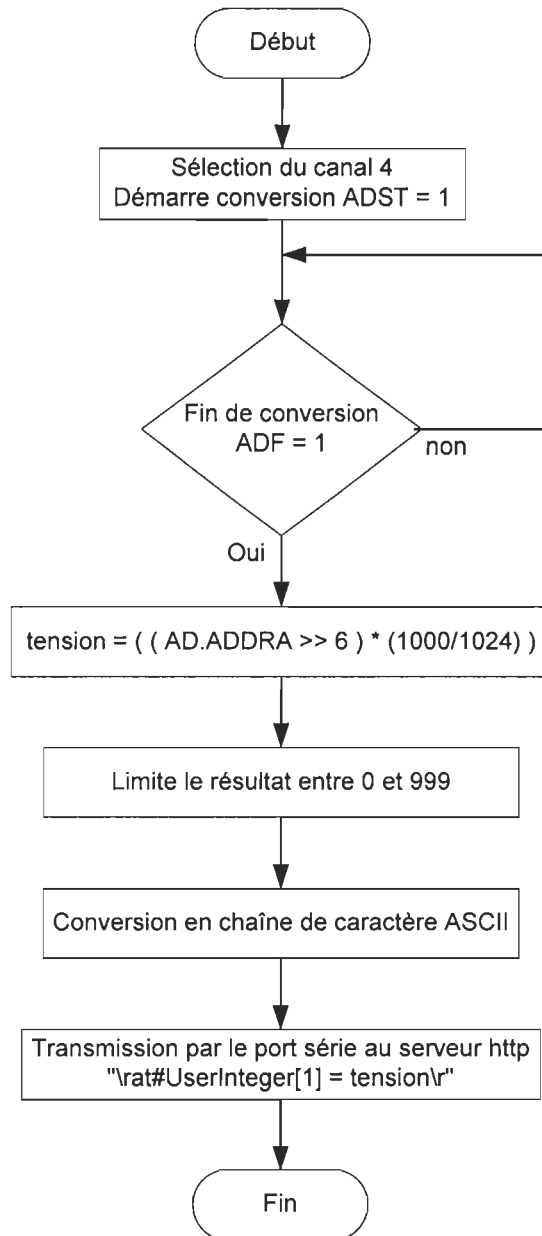
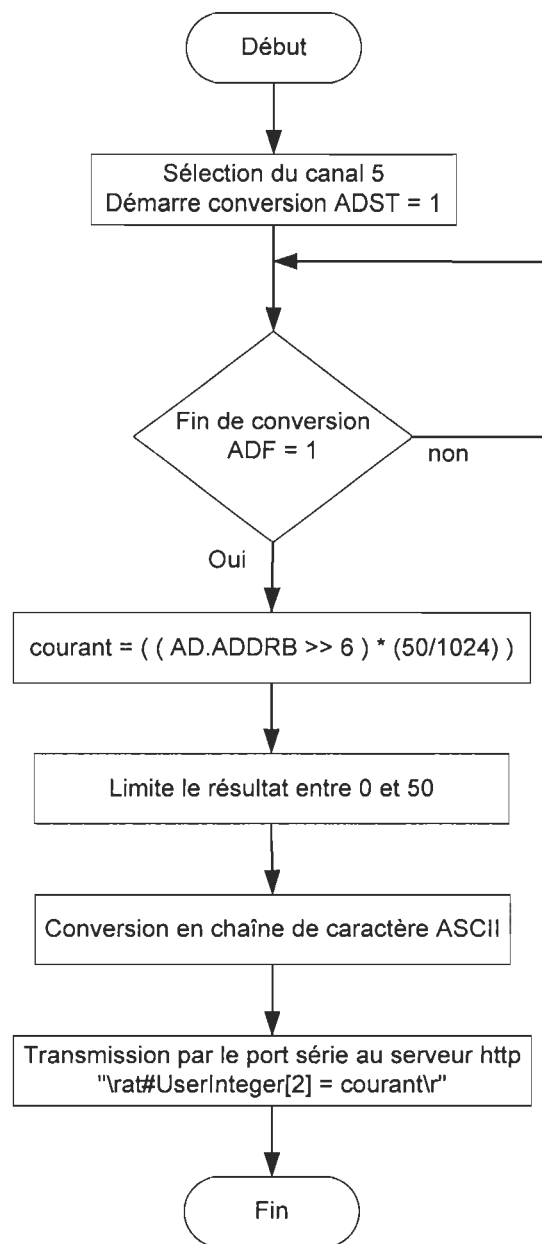


Figure 49 Algorithme du programme de mesure de la tension



**Figure 50** Algorithme du programme de mesure du courant.

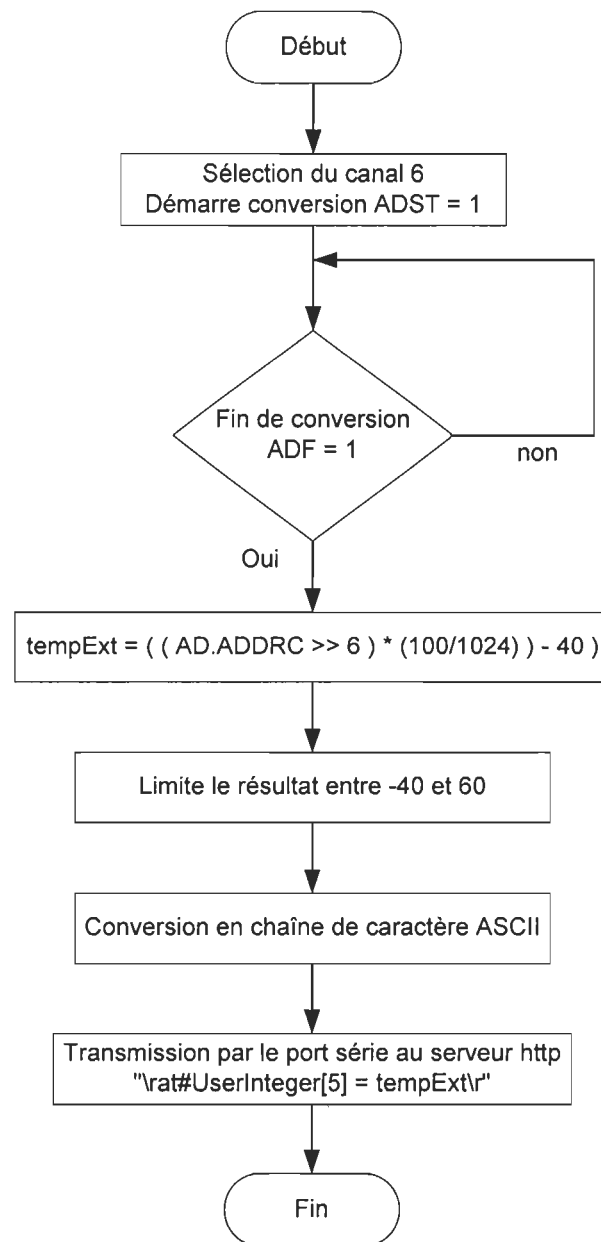
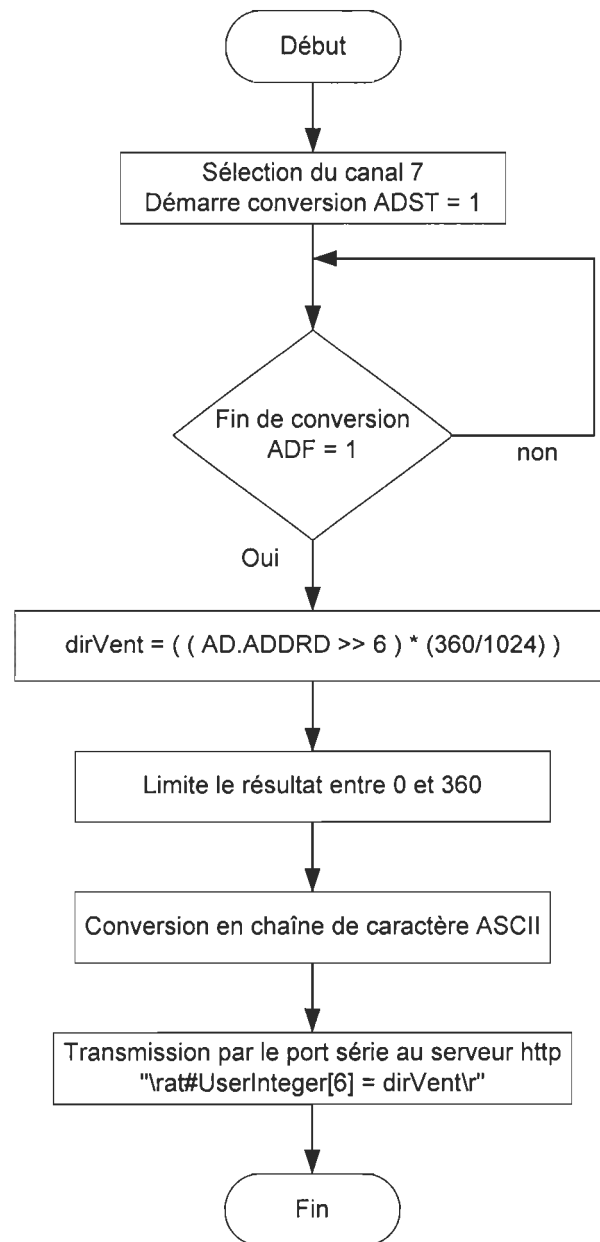


Figure 51 Algorithme du programme de mesure de la température.



**Figure 52** Algorithme du programme de mesure de la direction du vent.

#### 4.6 Conversion de la mesure de la vitesse du vent

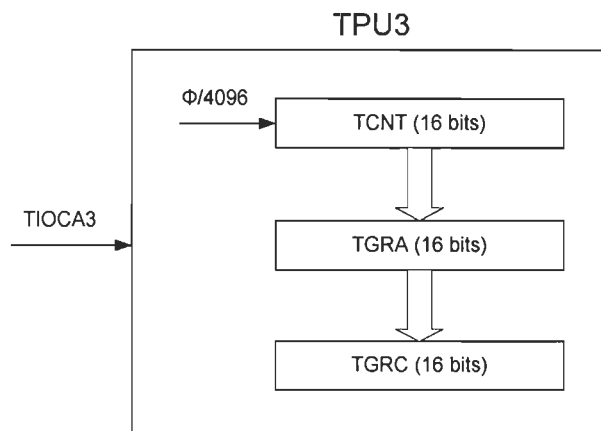
Le microcontrôleur reçoit une onde carrée variant de 0 à 5 volt à courant continu dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du vent tel que spécifié dans le chapitre précédent. Le microcontrôleur va lire, à intervalle régulier d'environ une seconde, la vitesse du vent. Afin d'évaluer la fréquence de l'onde carrée, on utilise le temporisateur #3 (TPU3) qui est configuré en "input capture" sur la broche TIOCA3 (PB0) du microcontrôleur. L'horloge interne du temporisateur est configurée à partir de l'horloge externe du microcontrôleur divisée par 4096. La fréquence de l'horloge externe est de 25 MHz donc la fréquence de l'horloge interne sélectionnée est d'environ 6,103 kHz.

$$f_3 = \frac{25MHz}{4096} = 6103,52Hz$$

**Équation 25** Fréquence de l'horloge interne.

$$T_3 = \frac{1}{6103,52Hz} = 163,84\mu s$$

**Équation 26** Période de l'horloge interne.



**Figure 53 Temporisateur de mesure de la vitesse du vent.**

Le registre TCNT du temporisateur s'incrémente de un à toutes les  $163,84 \mu s$  ou de 6103 à chaque seconde. À chaque front montant du signal sur la broche TIOCA3 le contenu du temporisateur TCNT est transféré dans le registre TGRA. Puisque le temporisateur est configuré pour fonctionner en mode tampon ("buffer"), il transfère aussi la valeur précédente du registre TGRA dans le registre TGRC. Ainsi, pour évaluer la fréquence (ou la période) du signal, il s'agit de calculer la différence entre la lecture actuelle (TGRA) et la lecture précédente (TGRC).

La valeur de la fréquence varie entre 0,85 et 125 Hz pour l'anémomètre, ce qui correspond à des périodes de 8 ms à 1,18 secondes. Le temporisateur est configuré pour faire la lecture d'un signal d'une période minimale de  $163,84 \mu s$ , ce qui est amplement suffisant et procure une bonne précision de la lecture. Pour une vitesse de vent maximale correspondant à une période de 8 ms, la différence entre les deux registres TGRA et TGRC devrait être d'environ 49.

$$\Delta_{\min} = TGRA - TGRC = \frac{8 * 10^{-3}}{163,84 * 10^{-6}} \approx 49$$

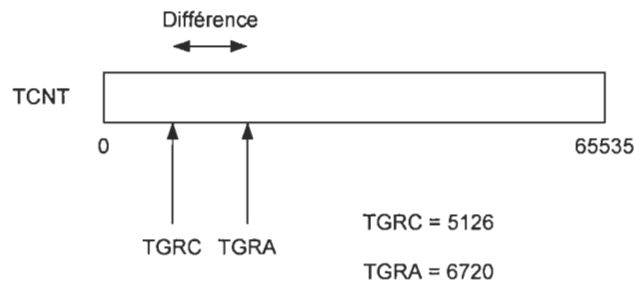
**Équation 27** Variation minimale des registres de calcul de la vitesse du vent.

Pour une vitesse de vent minimum, correspondant à une période de 1,18 secondes, la différence entre les deux registres TGRA et TGRC devrait d'être d'environ 7180.

$$\Delta_{\max} = TGRA - TGRC = \frac{1,176}{163,84 * 10^{-6}} \approx 7180$$

**Équation 28** Variation maximale des registres de calcul de la vitesse du vent.

Le contenu du registre TCNT varie continuellement entre 0 et 65535. Comme calculé précédemment la différence entre les registres TGRC et TGRA sera incluse dans l'intervalle [49 et 7180]. Par exemple, si la valeur du registre TGRA est de 6720 et du registre TGRC est de 5126, quelle est la période ou la fréquence du signal ?



**Figure 54** Exemple de calcul de la vitesse du vent.

La différence entre la valeur des registres TGRA et TGRC est de  $6720 - 5126 = 1594$ . Nous savons que le registre TCNT s'incrémente à toutes les  $163,84 \mu s$ . Donc, pour s'incrémenter de 1594, il faudra  $261,16 ms$ .

$$T(s) = (TGRA - TGRC) * 163,84 \mu s = 261,18 ms$$

**Équation 29 Période du calcul de la vitesse du vent.**

Ainsi, la fréquence du signal de vitesse du vent peut être facilement évaluée.

$$f(Hz) = \frac{25MHz / 4096}{TGRA - TGRC} = \frac{6103,52}{1594} = 3,83 Hz$$

**Équation 30 Fréquence du calcul de la vitesse du vent.**

Finalement, il ne reste qu'à appliquer la formule (équation 1) du manufacturier pour trouver la vitesse du vent en mètres par seconde.

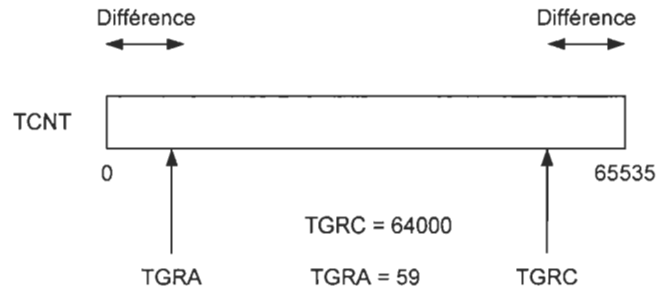
$$Vit\_vent = \left( \frac{25MHz / 4096}{TGRA - TGRC} \right) * 0,765 + 0,35$$

$$Vit\_vent = 3,83 Hz * 0,765 + 0,35 = 3,28 \text{ mètres/seconde}$$

**Équation 31 Calcul de la vitesse du vent sans débordement du registre.**



Puisque le registre TCNT est de 16 bits, il est possible qu'il y ait un débordement lors du transfert aux registres TGRA et TGRC. Ainsi, il est possible que la valeur de TGRA soit plus petite que celle de TGRC. Il faut tenir compte de ce cas dans le programme.



**Figure 55 Débordement lors de la mesure de la vitesse du vent.**

Lors d'un débordement du registre TCNT, l'évaluation de la vitesse du vent doit se faire comme suit:

$$Vit\_vent(m/s) = \left( \frac{25MHz/4096}{65535 - (TGRC - TGRA)} \right) * 0,765 + 0,35$$

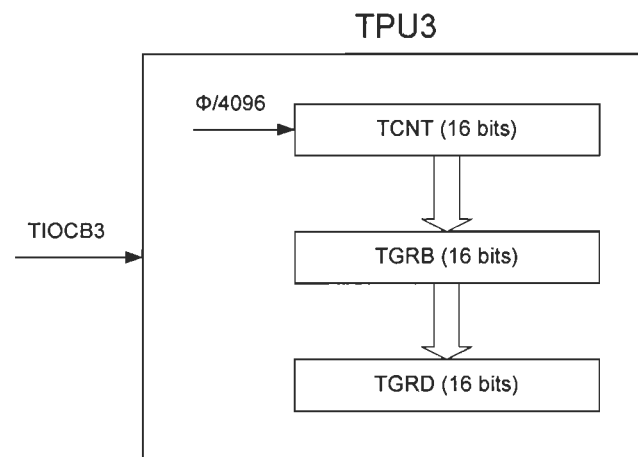
**Équation 32 Calcul de la vitesse du vent avec débordement du registre.**

Puisque la mesure de la vitesse du vent doit être transmise par le port série au module Internet embarqué, on doit la convertir en une chaîne de caractères en code Ascii.



#### 4.7 Conversion de la mesure de la fréquence

Pour la mesure de la fréquence de la tension produite par la génératrice, nous utilisons exactement la même technique que pour la mesure de la vitesse du vent. Le microcontrôleur reçoit une onde carrée variant de 0 à 5 volt à courant continu dont la fréquence est proportionnelle à la fréquence du signal de la tension produite tel que précisé au chapitre précédent. Le microcontrôleur lit, à un intervalle régulier d'environ une seconde, la fréquence. Afin d'évaluer la fréquence de l'onde carrée, nous utilisons le temporisateur #3 (TPU3) qui est configuré en "input capture" sur la broche TIOCB3 (PB1) du microcontrôleur. L'horloge interne du temporisateur est configurée à partir de l'horloge externe du microcontrôleur divisée par 4096. La fréquence de l'horloge externe est de 25 MHz donc la fréquence de l'horloge interne est d'environ 6,103 kHz.



**Figure 57** Temporisateur de mesure de la fréquence.

Le registre TCNT du temporisateur s'incrmente de un à toutes les  $163,84 \mu s$  ou de 6103 à chaque seconde. À chaque front montant du signal sur la broche TIOCB3 le contenu du temporisateur TCNT est transféré dans le registre TGRB. Puisque le temporisateur est configuré pour fonctionner en mode tampon ("buffer"), il transfère aussi la valeur précédente du registre TGRB dans le registre TGRD. Ainsi, pour évaluer la fréquence (ou la période) du signal, il s'agit de calculer la différence entre la lecture actuelle (TGRB) et la lecture précédente (TGRD).

La valeur de la fréquence varie entre quelques Hertz et 60 Hz pour le signal de la tension ce qui correspond à une période minimale de  $16,67 ms$ . Le temporisateur est configuré pour faire la lecture d'un signal d'une période minimale de  $163,84 \mu s$ , ce qui est amplement suffisant et procure une bonne précision de la lecture. Pour une fréquence maximale correspondant à une période de  $16,67 ms$ , la différence entre les deux registres TGRB et TGRD devrait d'être d'environ 101.

$$\Delta_{\min} = TGRB - TGRD = \frac{16,67 * 10^{-3}}{163,84 * 10^{-6}} \approx 101$$

**Équation 33 Variation minimale des registres de calcul de la fréquence.**

Le contenu du registre TCNT varie continuellement entre 0 et 65535. Comme calculé précédemment, la différence entre les registres TGRD et TGRB aura une valeur minimale

de 101. Les mêmes calculs faits pour la mesure de la vitesse du vent peuvent être effectués pour la mesure de la fréquence.

Ainsi, la fréquence du signal de tension peut être facilement évaluée.

$$f(Hz) = \frac{25MHz/4096}{TGRB - TGRD}$$

**Équation 34 Fréquence du signal de tension sans débordement du registre.**

Puisque le registre TCNT est de 16 bits, il est possible qu'il y ait un débordement lors du transfert aux registres TGRB et TGRD. Ainsi, il est possible que la valeur de TGRB soit plus petite que celle de TGRD. Il faut tenir compte de cette situation dans le programme. Lors d'un débordement du registre TCNT l'évaluation de la fréquence doit se faire comme suit:

$$f(Hz) = \left( \frac{25MHz/4096}{65535 - (TGRD - TGRB)} \right)$$

**Équation 35 Fréquence du signal de tension avec débordement du registre**

Lorsque la tension générée par la génératrice est plus petite que 50 volts efficaces, il devient difficile pour les circuits électroniques de mesurer adéquatement la fréquence du signal. Ainsi, lorsque la tension est trop faible et inadéquate pour la production d'énergie, la valeur de la fréquence est mise à zéro.

Puisque la fréquence de la tension produite doit être transmise par le port série au serveur HTTP embarqué, on doit la convertir en une chaîne de caractères en code Ascii.

#### 4.7.1 Algorithme du programme de mesure de la fréquence de la tension

L'algorithme du programme de mesure de la fréquence de la tension est illustré dans la figure 58:

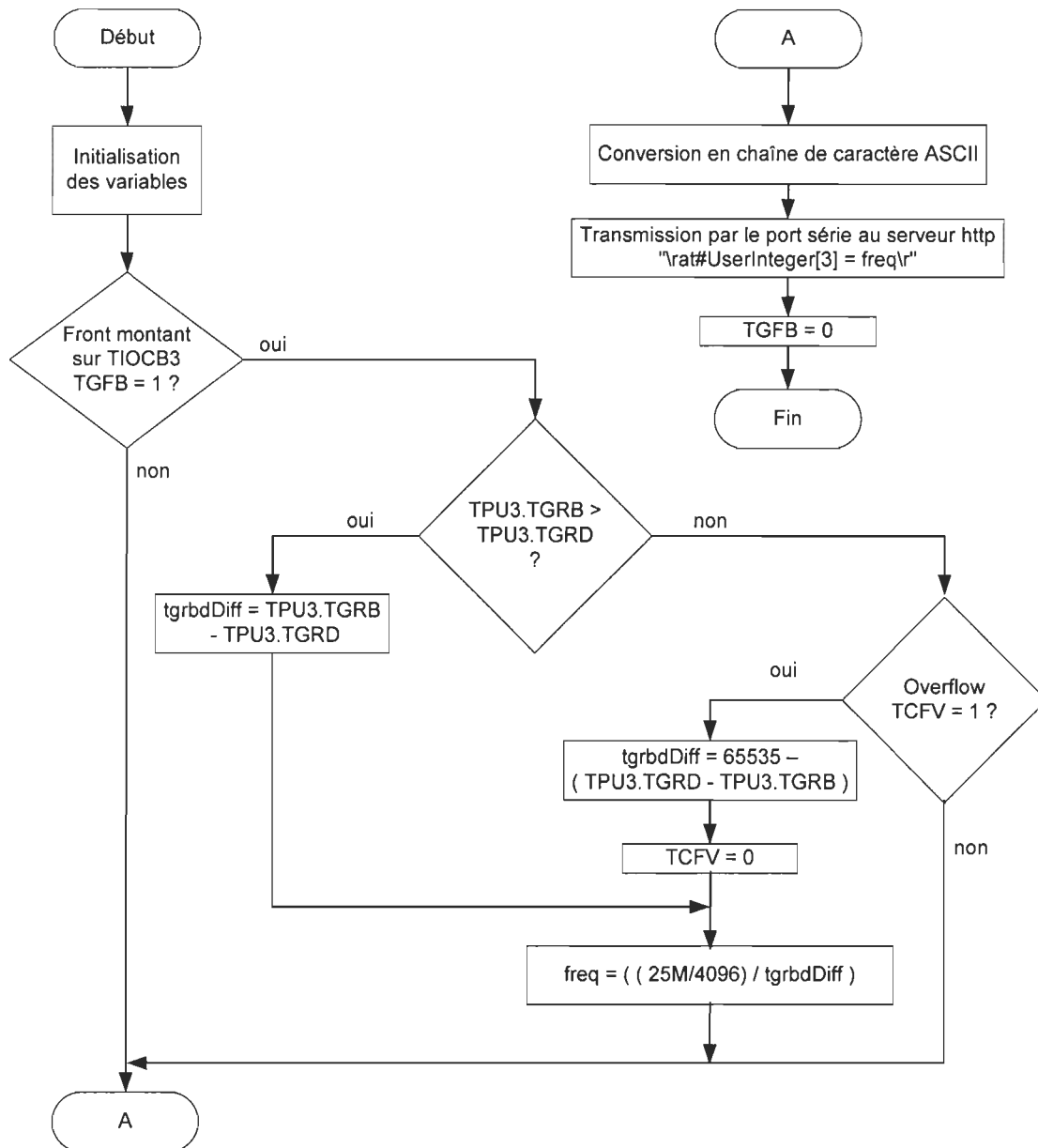


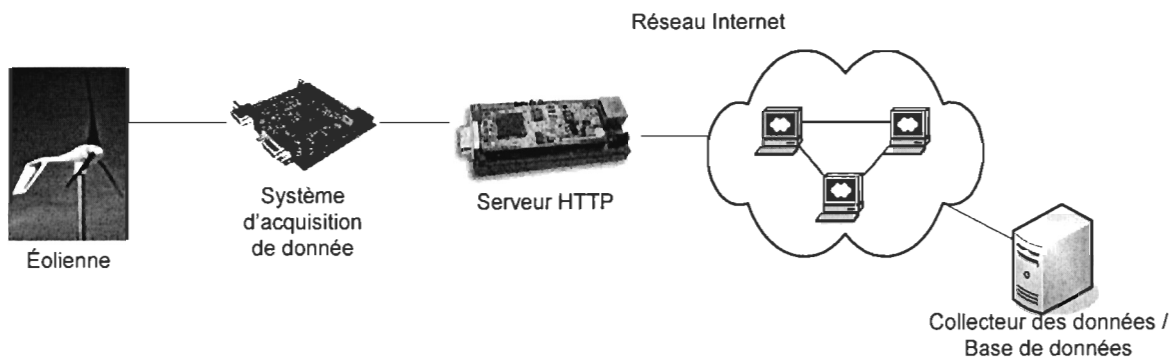
Figure 58 Algorithme du programme de mesure de la fréquence

## CHAPITRE 5

### SYTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES

#### 5.1 Introduction

Le système de collecte de données est utilisé pour récupérer les données du serveur HTTP de la carte d'acquisition située sur le site de l'éolienne et emmagasiner celle-ci dans une base de données SQL et dans un fichier au format csv (figure 59).



**Figure 59 Architecture du système de collecte des données**

Pour les besoins de la recherche universitaire et de la gestion de l'éolienne, le système d'acquisition et de sauvegarde des données à développer doit répondre aux spécifications suivantes:



- Intervalle d'acquisition des données : 1 à 2 secondes. Ceci permet de mettre en évidence des caractéristiques particulières du vent (rafales).
- Intervalle d'enregistrement des données : valeur moyenne enregistrée pour des périodes, au choix, de: 1 minute, 2 minutes, 5 minutes, 10 minutes, 15 minutes, 30 minutes et 60 minutes.
- Durée de l'acquisition des données : en fonction de l'intervalle d'enregistrement des données, possibilité d'avoir des durées d'acquisition entre 12 heures et 1 an. Ici, selon qu'on enregistre la moyenne des données sur un intervalle de 1 minute à 60 minutes, il faut que le système ait la capacité d'emmagasiner les données jusqu'à 1 an. L'analyse des données sur une année permet d'évaluer avec plus d'exactitude le potentiel éolien d'un site, en tenant compte des variations saisonnières de la température.
- Paramètres enregistrés: numéro de station, année, mois, jour, heure, minute, seconde, température, vitesse du vent, direction du vent, tension, courant, fréquence et puissance.
- Paramètres calculés enregistrés: les valeurs moyennes sur la période, les écarts-type et les minimums et maximums quotidiens.

## 5.2 Principe

Tel que mentionné au chapitre précédent, les données récupérées de l'éolienne sont disponibles sur le serveur HTTP via une page html. Ainsi, pour récupérer les données, on utilise la méthode "GET" du protocole HTTP afin de recevoir le fichier data.html. Le format de ce fichier est donné au tableau 10. L'application Java de collecte de données

communiqué avec le serveur HTTP de l'éolienne et récupère le fichier data.html. L'application lit ligne par ligne ce fichier et lorsqu'elle rencontre une balise xml `<%ed_userInteger[x]>` elle emmagasine la donnée pour un traitement ultérieur.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<racine>
  <eole>
    <tension><%ed_UserInteger[1]%></tension>
    <courant><%ed_UserInteger[2]%></courant>
    <freq><%ed_UserInteger[3]%></freq>
    <vVent><%ed_UserInteger[4]%></vVent>
    <temp><%ed_UserInteger[5]%></temp>
    <dVent><%ed_UserInteger[6]%></dVent>
    <b0><%ed_UserInteger[7]%></b0>
    <b1><%ed_UserInteger[8]%></b1>
    <b2><%ed_UserInteger[9]%></b2>
    <b3><%ed_UserInteger[10]%></b3>
  </eole>
</racine>
```

**Tableau 10** Format du fichier data.html sur le serveur HTTP embarqué

Lorsque toutes les lignes du fichier sont lues, la puissance et l'énergie cumulée sont calculées. Ensuite, si l'archivage des données dans la base de données est actif, on calcule la moyenne, l'écart type, la valeur maximale et minimale aux dix minutes.

### 5.3 Interface utilisateur

L'interface utilisateur est composée de trois volets. Un premier volet permet la configuration de la collecte des données. On peut modifier le URL d'où proviennent les données, démarrer ou arrêter la collecte des données, modifier la période de collecte des

données, activer l'affichage à l'écran des données, activer la sauvegarde dans un fichier csv ou dans la base de données et, finalement, on peut modifier le nom du fichier d'enregistrement des données.

The screenshot shows the EoleWeb application window. It is divided into three main sections: Configuration, Valeurs Actuelles (Current Values), and Valeurs dernier 10 minutes (Last 10 minutes values).

**Configuration:**

- URL:
- Buttons:
- Période (s):
- Checkboxes: ☒ Affiché, ☐ Fichier csv, ☒ Base de données
- Répertoire/fichier:

**Valeurs Actuelles:**

Date:	2005-08-22 13:31:49.615		
Puissance:	12500 VA	Énergie 24H:	6 kwh
Tension:	500 V	Vitesse du Vent:	12 km/h
Courant:	25 A	Direction du vent:	SE
Fréquence:	60 Hz	Température:	52 °C

**Valeurs dernier 10 minutes:**

Date:	2005-08-22 13:31:47.583			
	Moy:	Écart:	Min:	Max:
Puissance:	12500.0 VA	0.0	12500 VA	12500 VA
Vitesse du Vent:	12.0 km/h	0.0	12 km/h	12 km/h
Direction du vent:	SE	0	-----	-----
Temp.:	52.0 °C	0.0	52 °C	52 °C

Figure 60 Interface utilisateur pour la collecte des données

Le second volet, on visualise les valeurs provenant du serveur HTTP de l'éolienne et dans le dernier volet, sont affichées les statistiques (moyenne, écart-type, minimum et maximum) d'une période de dix minutes.

#### 5.4 Algorithme du système de collecte de données

L'algorithme du programme de collecte de données est illustré dans la figure 61.

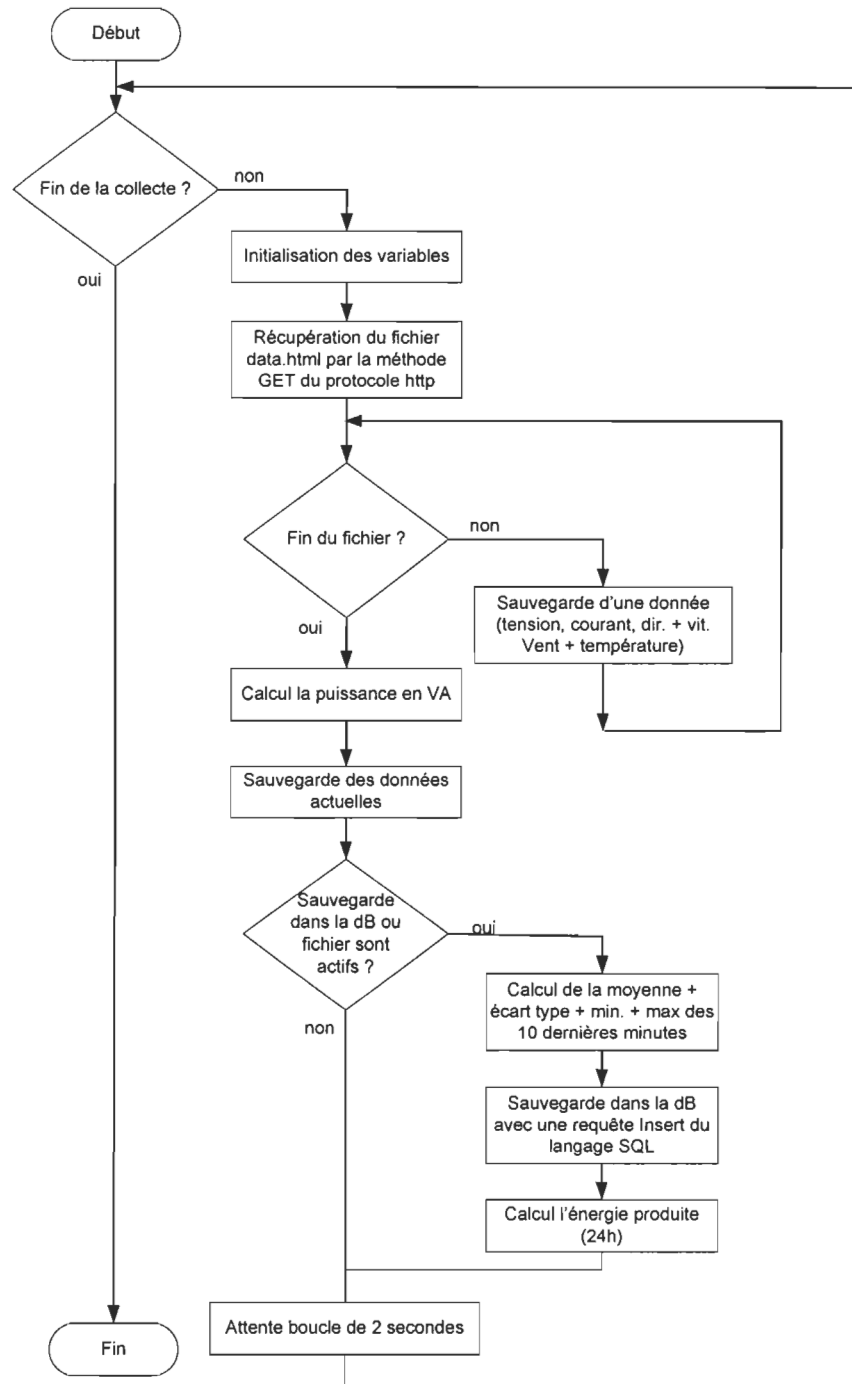


Figure 61 Algorithme du processus de collecte des données

## 5.5 Base de données

Le serveur de base de données SQL utilisé est "mysql". Ce serveur offre l'avantage d'être gratuit et d'être bien documenté sur Internet. La base de données utilise les tables suivantes:

datanow: Emmagasine les données actuelles.

timestp	vvent	dvent	pva	freq	temp
timestamp	int	int	int	int	int

timestp: Date et heure de la lecture des données. Type timestamp.

vvent: vitesse du vent. Type integer.

dvent: direction du vent. Type integer.

pva: puissance en Volt-Ampère. Type integer.

freq: fréquence de la tension produite. Type integer.

temp: température. Type integer.

energie24h: Emmagasine l'énergie cumulée par 24 heures.

timestp	energie
timestamp	int

energie: Énergie accumulée. Type integer.

puiss10m: Emmagasine les statistiques de puissance aux dix minutes.

timestp	moy	ecart	min	max
timestamp	double	double	int	int

moy: Moyenne des lectures de puissance sur une période de dix minutes.

ecart: Écart-type des lectures de puissance sur une périodes de dix minutes.

min: Valeur minimum de la puissance lue sur la période de dix minutes.

max: Valeur maximum de la puissance lue sur la période de dix minutes.

vent10m: Emmagazine les statistiques du vent aux dix minutes.

timestp	moy	ecart	min	max	dirdom
timestamp	double	double	int	int	int

dirdom: direction dominante du vent pendant la période de lecture.

## 5.6 Classes du programme de collecte de données

Les modules développés pour la collecte des données sont:

- `eoleweb.collect.EoleCollect`: Classe principale d'exécution du programme de collecte de données.
- `eoleweb.collect.MainFrame`: Classe de l'interface utilisateur du programme de collecte des données. Permet de visualiser les données actuelles et les statistiques des derniers dix minutes à l'écran. Elle permet aussi de configurer le type de stockage des données dans un fichier csv et/ou dans la base de données et se charge de la mise à jour de la base de données.
- `eoleweb.collect.CalculEnergie`: Classe qui permet de calculer l'énergie produite en 24 heures. Le calcul de l'énergie se fait par l'accumulation de l'énergie à chaque deux secondes par l'équation donnée à la section 3.4.1.
- `eoleweb.collect.CalculStat`: Classe qui permet de calculer la moyenne, l'écart type, la valeur maximum et la valeur minimum de la puissance, de la température et de la vitesse du vent.

- `eoleweb.data.Datanow`: Classe qui permet de gérer les données actuelles reçues du serveur de l'éolienne. Les données actuelles sont emmagasinées dans la base de données.
- `eoleweb.data.Energie24h`: Classe qui permet de gérer l'énergie produite durant les dernières 24h. Les données d'énergie actuelle et à chaque 24 heures sont emmagasinées dans la base de données.
- `eoleweb.data.Puiss10m`: Classe qui permet de gérer les statistiques de la puissance aux 10 minutes. Les données de puissance sont emmagasinées dans la base de données.
- `eoleweb.data.Temper10m`: Classe qui permet de gérer les statistiques de la température aux 10 minutes. Les données de température sont emmagasinées dans la base de données.
- `eoleweb.data.Vent10m`: Classe qui permet de gérer les statistiques du vent aux 10 minutes. Les données de vent sont emmagasinées dans la base de données.

## 5.7 Format du fichier csv

Les données enregistrées sur le disque dur sont formatées selon le tableau 11.

Date/ Heure	Puissance				Vent					Température			
	moy.	écart- type	min	max	moy.	écart- type	min	max	direction dominante	moy.	écart- type	min	max

**Tableau 11 Format du fichier csv**

Par exemple, à la visualisation du fichier csv, nous obtenons:

2005-08-22 11:23:55.911,12500.0,0.0,12500,12500,12.0,0.0,12,12,120,0,25.0,0.0,25,25
2005-08-22 11:24:01.896,12500.0,0.0,12500,12500,12.0,0.0,12,12,120,0,25.0,0.0,25,25
2005-08-22 11:24:07.896,12500.0,0.0,12500,12500,12.0,0.0,12,12,120,0,25.0,0.0,25,25
2005-08-22 11:24:13.896,12500.0,0.0,12500,12500,12.0,0.0,12,12,120,0,25.0,0.0,25,25
2005-08-22 11:24:19.896,12500.0,0.0,12500,12500,12.0,0.0,12,12,120,0,25.0,0.0,25,25

**Tableau 12 Exemple fichier csv**



## **CHAPITRE 6**

### **ARCHITECTURE LOGICIELLE**

#### **6.1 Introduction**

Dans cette application, nous avons accès en tout temps aux données de l'éolienne par Internet. Comme vu précédemment, les données de l'éolienne sont emmagasinées dans une base de données. Les données statistiques sont accessibles aux utilisateurs autorisés seulement en utilisant un logiciel commercial de requêtes SQL. Par Internet, tous les utilisateurs peuvent avoir accès aux données actuelles dans un navigateur.

L'accès aux données est possible grâce au travail d'un applet qui s'exécute dans le poste du client et d'un servlet qui s'exécute sur le poste du serveur. Le rôle de l'applet est de fournir une interface utilisateur au client afin de visualiser les données provenant de l'éolienne. L'applet communique aux deux secondes avec le serveur afin d'obtenir les nouvelles données à afficher. Le rôle du servlet est de recevoir les demandes, d'interroger la base de données et de fournir le résultat aux applets.

## 6.2 Servlet

Les servlet sont au serveur Web ce que les applets sont au navigateur pour le client. Les servlets sont des applications Java fonctionnant du côté serveur au même titre que les CGI et les langages de script côté serveur tels que ASP ou PHP. Les servlets permettent donc de gérer des requêtes HTTP et de fournir au client une réponse HTTP dynamique (donc de créer des pages web dynamiquement).

Ainsi, les servlets s'inscrivent dans une architecture 3-tier (figure 62), ce qui signifie qu'un serveur supportant les servlets peut servir d'intermédiaire (on parle généralement de serveur applicatif) entre le navigateur du client et une base de données (on parle généralement de serveur de données) en permettant un accès transparent à celle-ci. Un servlet fournit ainsi les éléments nécessaires à la connexion au système de gestion de bases de données et, à la manipulation des données, grâce au langage SQL.

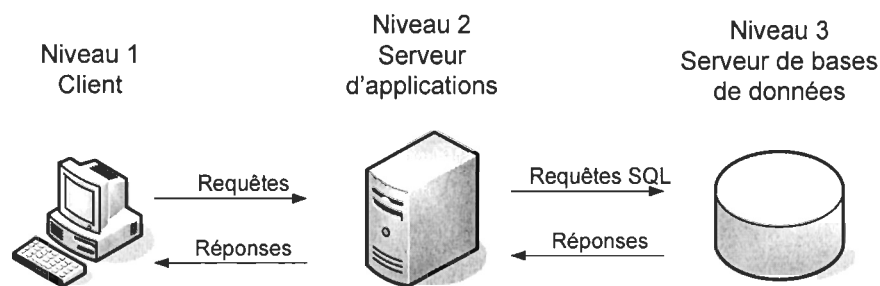
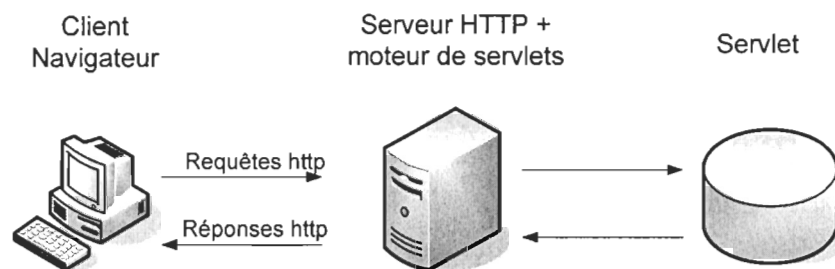


Figure 62 Architecture 3-tiers

Un servlet est exécuté au moment de la requête. Un servlet est une classe Java dérivant de la classe *HttpServlet*, et utilisant les méthodes *doGet()* et *doPost* permettant de renvoyer une réponse par le protocole HTTP. Les servlets ont de nombreux avantages par rapport aux autres technologies côté serveur. Tout d'abord, étant donné qu'il s'agit d'une technologie Java, les servlets fournissent un moyen d'améliorer les serveurs web sur n'importe quelle plateforme, d'autant plus que les servlets sont indépendantes du serveur web. En effet, les servlets s'exécutent dans un moteur de servlet utilisé pour établir le lien entre servlet et le serveur web. Ainsi le programmeur n'a pas à se soucier de détails techniques tels que la connexion au réseau, la mise en forme de la réponse HTTP, etc. On appelle conteneur de servlet une classe permettant de manipuler un servlet.



**Figure 63 Architecture serveur HTTP et Servlet**

D'autre part, les servlets sont chargés automatiquement lors du démarrage du serveur ou bien lors de la connexion du premier client. Les servlets sont donc actives (résidentes en mémoire) et prêtes à traiter les demandes des clients grâce à des "threads".

L'un des principaux atouts des servlets est la réutilisation, permettant de créer des composants encapsulant des services similaires, afin de pouvoir les réutiliser dans des applications futures.

Enfin un servlet, étant une application Java, peut utiliser toutes les API Java pour de communiquer avec des applications extérieures, se connecter à des bases de données, accéder aux entrée-sorties (fichiers par exemple), etc.

Pour développer un servlet fonctionnant avec le protocole HTTP, il suffit de créer une classe étendant *HttpServlet* (qui implémente elle-même l'interface *Servlet*). La classe *HttpServlet* permet de fournir une implémentation de l'interface *Servlet* spécifique à HTTP. La classe *HttpServlet* surcharge la méthode *service* en lisant la méthode HTTP utilisée par le client, puis en redirigeant la requête vers une méthode appropriée. Les deux principales méthodes du protocole HTTP étant GET et POST, il suffit de surcharger la méthode adéquate afin de traiter la requête :

- Si la méthode utilisée est GET, il suffit de redéfinir la méthode public void `doGet(HttpServletRequest req, HttpServletResponse res);`
- Si la méthode utilisée est POST, il suffit de redéfinir la méthode public void `doPost(HttpServletRequest req, HttpServletResponse res);`

### 6.3 Interface utilisateur

L'interface utilisateur est composée d'une partie comprenant des balises html et de deux applets. Un applet est utilisé pour faire afficher sur des cadrans les données actuelles de l'éolienne. L'autre applet s'occupe de faire afficher l'image provenant de la caméra IP.

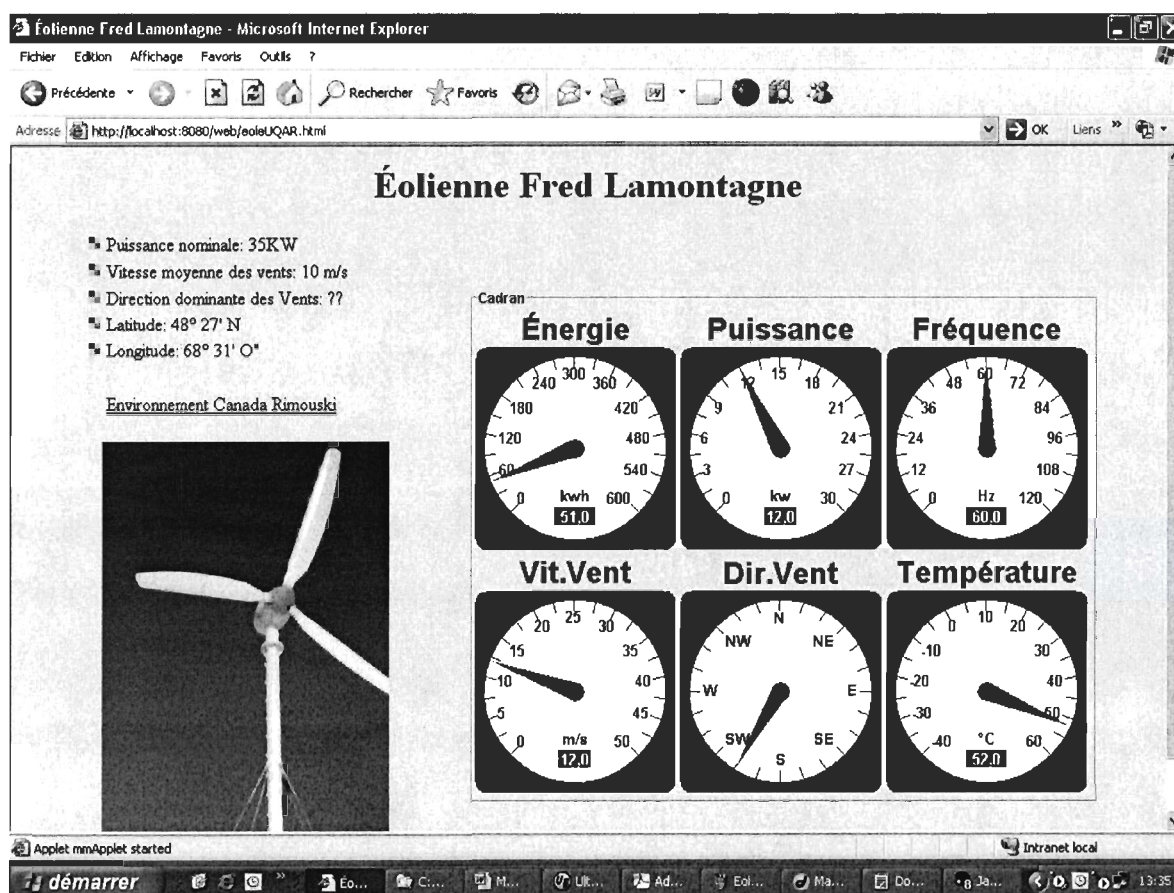


Figure 64 Interface utilisateur

## **CONCLUSION**

La production d'énergie éolienne connaît un essor actuellement et la protection de l'environnement est de plus en plus importante dans les habitudes de vie de la population. Actuellement, au Québec, plusieurs projets de parcs éoliens sont en développement. Les technologies de communications actuelles permettent la supervision de la production de ces parcs. Que ce soit sur un site facile d'accès ou un site éloigné, l'utilisation d'Internet permet de récupérer toutes les données de production d'un parc éolien. Le développement et la réalisation d'un système de supervision et d'acquisition de données à distance d'une éolienne par Internet nécessitent la connaissance de différentes technologies.

L'objectif principal de cette recherche consiste à développer une application permettant de faire la supervision, le contrôle et l'acquisition de données sur une éolienne via le réseau Internet. La connexion d'une éolienne à Internet offre la possibilité d'avoir accès en temps réel ou différé, aux données et au contrôle de celle-ci de n'importe où. Cette accessibilité et cette connectivité apportent plusieurs avantages : la supervision à distance de l'état de l'éolienne, la gestion à distance des paramètres, la visualisation des données de production, la supervision en temps réel, l'échange de données par courriel et l'analyse statistique des données et le support aux travaux de recherche en modélisation. L'acquisition des données météorologiques et de production permet de mieux planifier les

entretiens, de valider la courbe de puissance, d'optimiser le rendement et de fournir des données pour des travaux de recherche.

L'analyse des besoins d'un projet de supervision à distance doit tenir compte de critères qui dépendent de la situation géographique de l'éolienne tels que l'accessibilité du site et la disponibilité des moyens de communication par Internet. Il faut aussi tenir compte de critères tels que l'acquisition de données avec traitement statistique, la supervision en temps réel ou en différé, etc. Ainsi, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Pour une application simple de supervision, les équipements nécessaires à la mise en oeuvre du système sont un micro-ordinateur avec accès à Internet. Pour une application plus élaborée de supervision et d'acquisition de données en temps réel, nous pouvons utiliser un serveur HTTP /JSP, une base de données SQL et un accès à Internet haute vitesse. Le serveur HTTP /JSP gère la base de données et l'interactivité avec les utilisateurs.

Le système développé présente les caractéristiques techniques suivantes :

1. Fournit des informations en permanence, 24h/24, via un site Internet, des paramètres vitaux du fonctionnement de l'éolienne et permet un accès sans restrictions au public.
2. Affiche les paramètres instantanés de puissance et fréquence délivrées par l'éolienne, la vitesse et la direction du vent, la température extérieure, la production cumulée (en kWh) des 24 dernières heures et l'état de l'éolienne (en production, en démarrage ou à l'arrêt).

3. Présente des informations à l'aide d'une page web conçue pour une compréhension facile par des non-initiés avec un affichage bilingue.
4. Fournit une image en provenance d'une caméra ("Web Cam") permettant de visualiser en temps réel le fonctionnement de l'éolienne (avec un taux de rafraîchissement de l'image adapté à la vitesse de connexion Internet).
5. La page web fournit un lien Internet vers les conditions météo actuelles de la station d'Environnement Canada la plus proche;
6. Présente les caractéristiques techniques de la centrale éolienne, soit la puissance nominale, la vitesse moyenne des vents sur le site, la direction dominante du vent, la latitude et longitude de l'emplacement de l'éolienne;
7. La page web offre, par lien protégé par mot de passe, un accès aux statistiques d'acquisition des données.

Une recherche bibliographique a été effectuée sur des projets de recherche similaires. Par la suite, la lecture de près de 30 articles, sur la supervision et l'acquisition de données à distance par Internet, a permis de constater l'état de la recherche dans ce domaine et d'élaborer les démarches à suivre pour la réalisation du projet. Des articles consultés, 9 ont été retenues, car plusieurs références étaient répétitives. La plupart des travaux de recherche récents dans le domaine de la supervision et de l'acquisition de données par Internet utilisent une architecture client / serveur. Un micro-ordinateur, situé sur le site, s'occupe de récupérer les données provenant d'une carte d'acquisition. Ce micro-ordinateur fournit les données à un serveur HTTP connecté au réseau Ethernet. Le serveur HTTP se charge



ensuite de rendre les données disponibles aux clients. Depuis peu, la technologie du web embarqué est disponible. Ainsi, nous pouvons remplacer le micro-ordinateur installé sur le site, par un système avec microcontrôleur offrant la technologie web embarquée.

Ayant choisi de développer autant que possible le matériel et les logiciels, l'atteinte de l'objectif doit passer par des connaissances multidisciplinaires : l'énergie éolienne, l'électricité, l'électronique et l'informatique. Ainsi, pour le domaine éolien, des connaissances sont nécessaires sur le traitement statistique des données météorologiques, les caractéristiques du vent, l'échantillonnage des données et le choix des équipements de mesure des données météorologiques. Du côté électrique et électronique, des connaissances sont requises sur les caractéristiques électriques des éoliennes, la conception de circuit de traitement de signaux électroniques, l'interfaçage de circuits électroniques et le choix des capteurs de mesure des caractéristiques électriques d'une éolienne. Finalement, en informatique, des connaissances sont requises pour le développement de page HTML, la programmation en C d'un microcontrôleur pour le système d'acquisition de données, la programmation en Java de l'interface utilisateur par Internet et la collecte des données, la programmation côté serveur et le développement du système de requêtes des clients par Internet.

Le système développé a été expérimenté sur une éolienne de petite puissance (35 kW) en opération. Deux solutions ont été expérimentées. D'abord une solution permettant de visualiser en direct sur Internet une image de l'éolienne en production, de la tension

produite, du courant fournit, de la température, de la vitesse du vent et de la direction de vent sur le site. Avec cette solution, les clients se raccordent directement à la carte de communication de l'éolienne, ce qui peut causer un problème important. Le serveur HTTP de la carte de communication ne peut supporter que deux communications simultanées. Ceci limite le nombre de clients. Néanmoins, une communication par le protocole HTTP n'est pas constamment active car un client fait une requête au serveur, il envoie sa réponse et ferme la communication. Ainsi, nous avons programmé dans l'applet une demande de données à toutes les cinq secondes ce qui permet au serveur de répondre à plusieurs clients dans cet intervalle. L'avantage de cette solution est le développement facile de l'application. Les désavantages sont qu'on ne peut pas fournir en temps réel les données aux clients, il n'y a aucune sauvegarde de l'historique des données, il n'y a aucun calcul statistique de la moyenne, de l'écart type et plusieurs clients peuvent avoir accès directement au serveur HTTP de la carte de communication ce qui pourrait occasionner des problèmes.

Dans la deuxième solution expérimentée, nous avons ajouté un serveur qui permet de récolter les données de l'éolienne, d'archiver les données dans une base de données ou dans un fichier texte et d'interroger la base de données afin de répondre aux requêtes des clients. Cette solution comporte le développement d'un programme beaucoup plus élaboré puisqu'on doit gérer les échanges avec une base de données en utilisant un applet et un servlet.

Il existe plusieurs solutions afin de superviser à distance un éolienne. Le choix du matériel pour la communication est directement lié au système de contrôle de l'éolienne. Généralement, on utilise un automate programmable pour contrôler une éolienne et elles possèdent pour la plupart un module de communication TCP/IP ce qui facilite l'intégration. La particularité du système développé est qu'il est conçu autour d'un microcontrôleur ayant les capacités d'échanger de l'information par port série ou par Ethernet. Donc, il peut s'adapter à n'importe lequel système de contrôle déjà en place afin de rendre les informations disponibles sur Internet.

Les résultats obtenus sont très acceptables pour la supervision et l'acquisition de données à distance par Internet. L'acquisition des données peut s'effectuer pour toutes les variables à un intervalle aussi petit qu'une seconde ce qui permet de bien modéliser les phénomènes climatiques et le fonctionnement de la turbine éolienne.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] A.J. Bowen, N. Zakay, R.L. Ives. The field performance of a remote 10 kW wind turbine. *Renewable Energy* 2003; 28: p.13-33.
- [2] M.P. de Albuquerque, E. Lelièvre-Berna. Remote monitoring over the Internet. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* 1998; 412: p.140-145
- [3] E. Warnier, L. Yliniemi, P. Joensuu. Web based monitoring and control of industrial process. Report A no.22. September 2003
- [4] M. Benghanem, A. Hadj Arab, K. Mukadam. Data acquisition system for photovoltaic water pumps. *Renewable Energy* 1999; 17: p.385-396.
- [5] C.P. Lund, N. Wilmot, T. Pryor, G. Cole. Demonstrating remote area power supply systems on the World Wide Web. *Renewable Energy* 2001; 22: p.345-351.
- [6] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis. Cole. Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring. *Renewable Energy* 2003; 28: p.139-152.
- [7] Kostas Papadakis, Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis. A server database system for remote monitoring and operational evaluation of renewable energy sources plants. *Renewable Energy* 2005; XX: p.1-21. Article In Press.
- [8] Y.S. Ong, H.B. Gooi, S.F. Lee. Java-based applications for accessing power system data via intranet, extranet and internet. *Electrical Power & Energy Systems* 2001; 23: p.273-284.
- [9] Kostas Kalaitzakis, Eftichios Koutroulis, Vassilios Vlachos. Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems. *Measurement* 2003; 34: p.75-83.

## ANNEXE I

### CONTENU DU CD

#### Classe de la collecte des données

- EoleCollect.class
- MainFrame.class
- CalculStat.class
- CalculEnergie.class

#### Classe de l'applet

- Main.class
- MeterBoard.class
- MeterPhy.class
- MeterDir.class
- ConnectServlet.class

#### Classe des données

- Datanow.class
- Energie24h.class
- Puiss10m.class
- Temper10m.class
- Vent10m.class

#### Classe de la base de données

- DbAccess.class

#### Classe de la servlet

- EoleServlet.class

Classe de l'Applet Caméra ip

- WebCamApplet.class
- ReceiveSock.class
- VariableSet.class

Programme du microcontrôleur

- webmon.c
- delay.c
- delay.h
- hwsetup.c
- interface.c
- interface.h
- sci.c
- sci.h

## **ANNEXE II**

### **SPÉCIFICATION DE LA CAMÉRA IP**

#### **Image:**

Resolution: 640x480, 320x240, 160x120

Standard JPEG Compression – 10 levels of compressions

#### **Network:**

10baseT Ethernet or 100baseTX Fast Ethernet

Twisted pair category 5 cables, Standard RJ45 connector

Supporting protocol: TCP/IP, UDP, PING, ARP, FTP, TFTP, and HTTP

Configuring is achieved by private setup program and Web server built in administration page.

#### **Image Sensor :**

1/3" inch CMOS censor

326,688 pixels, 24-bit color, YUV digital output

Automatic exposure/Gain/White balance control

Image enhancement – brightness, contrast, gamma, saturation, sharpness, etc

664x492 pixel array elements

Electronic shutter: 1/30 s ~ 1/15734 s

Auto back light compensation: Automatic back light on or off depending on the lighting condition.

Lens specification :

Replaceable standard CS mount lens

Focal length 6.0 mm, Angular field of view 54°, Object distance 0.1m to infinity

Maximum Relative aperture F1.8

C-Mount adapter available

Hardware :

32bit RISC Net ARM CPU

ZORAN hardware compression chip

384 Kbytes video frame buffer

2M flash memory

SDRAM 8Mbyte 47

12V Power supply adapter included

Under 6W power consumption



System Requirements :

Operating systems: Windows 9x, Windows NT/2000, Linux, Unix, Mac, etc.

Internet Explorer 4.0 or higher.

JAVA applet for no PC user (Mac or Unix)

I/O Connector :

D-sub 9pin RS232 connector

1 Input to trigger the camera on external events.

1 Output of 12 V to signal external devices, max 150 mA

Installation :

Assigning IP address via IP installer program

Approvals :

EMC: FCC Class A, CE EN55022/1994, EN61000-3-2 & 3: 1995, EN50082-1: 1997

Operating Temperature :

0-50°C

Others :

Operating Status LED, Power LED, Image Capture LED, Network Packet Transmit LED

EEPROM clear button